

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Verificación del tren eléctrico de potencia de un monoplaza FSAE en una bancada de ensayo de motores eléctricos.

Autor: Eduardo Relaño Algaba

Tutor: Juan Manuel Mauricio Ferramola

Dpto. Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Verificación del tren eléctrico de potencia de un monoplaza FSAE en una bancada de ensayo de motores eléctricos.

Autor:
Eduardo Relaño Algaba

Tutor:
Juan Manuel Mauricio Ferramola
Profesor Titular

Dpto. Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Grado: Verificación del tren eléctrico de potencia de un monoplaza FSAE en una bancada de ensayo de motores eléctricos.

Autor: Eduardo Relaño Algaba
Tutor: Juan Manuel Mauricio Ferramola

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

Todo cuanto pueda escribirse en unas pocas líneas jamás podrá hacer justicia a la inmensa gratitud que ha de mostrarse a todas las personas que han hecho posible este proyecto. Cómo se pudiera agradecer a ARUS Andalucía Racing haber creado el sentimiento de pertenecer a una aventura constante que ha hecho descubrir la pasión por la ingeniería y la valía de muchos de los que hemos participado en ella donde antes sólo había dudas y pesadumbre. Gracias por demostrar que la constancia y el trabajo duro convierten cualquier tarea titánica en una cuestión de tiempo

Este texto está dedicado a todas esas personas, mucho más allá de patrocinadores e impulsores de ARUS. A todos los padres que simplemente han creído en nosotros desde el inicio, por muy altas en la madrugada fueran las horas a las que volvíamos a casa manchados de suciedad y grasa del taller, a mis padres Yolanda y Antonio en particular por la educación que me han dado y que me ha llevado hasta donde estoy y a mi hermano Raúl por estar ahí. Gracias.

A las personas que nos encontramos por el camino, de manera totalmente inesperada, y que resultan quedarse porque entienden tus pasiones. Largas temporadas han sufrido en particular de no poder vernos han sufrido Paloma y Jose Carlos por tener que entregar un diseño o deber cancelar cual una cita porque simplemente ARUS necesitaba de mi atención aquel día. Gracias por comprender mis locuras. Especial mención merecen las personas que te enseñan y aportan cosas todos los días, por eso Alba se merece un *gracias* por, con su cariño y comprensión, haberme enseñado que se puede amar tu trabajo y a las personas de forma sana. Cómo olvidar a todos los miembros del equipo, en particular con los que he pasado la mayoría de mis horas este año, a los que he querido, odiado y vuelto a querer de nuevo. Noelia, Jose Julio, Gamero, Pedro, Manuel, Gonzalo, Ramón y todos los miembros de E-Powertrónica, sin vosotros esto no hubiese tenido sentido.

Por último, es de capital importancia mencionar a todos los que de alguna manera han apoyado el proyecto aportando su ayuda, como todo el personal docente y del laboratorio de Ingeniería Eléctrica. Andrei, Fran, Carlos, Javier, Juan Manuel, Jose María, Paco, ... este bólide eléctrico lleva un poco de vosotros en su adentro.

Gracias a todos los que creyeron en lo imposible. Forza ARUS.

Eduardo Relaño Algaba
Autor

Sevilla, 2019



Figura 1 El ART-19e. Una experiencia que merece ser vivida..

Resumen

Es innegable que la industria automovilística se encuentra en una época de profundas reformas como manifiesto de un cambio palpable en la sociedad hacia un futuro más electrificado y sostenible. Proyectos como ARUS ofrecen a los estudiantes sumergirse en un reto tecnológico que les hace enfrentarse a restricciones de carácter técnicas, temporales y económicas como las que encontrarán en su futuro laboral, a la vez que expanden su conocimiento en el área de la movilidad eléctrica.

El trabajo que se dispone a leer pretende tratar de analizar los cambios en la procedimentación de las pruebas realizadas al tren eléctrico de potencia del nuevo concepto de monoplace de competición FSAE, diseñado por el equipo ARUS, a la vez que se guía a lector en la evolución y aprendizaje del equipo humano que las llevó a cabo. Para tal fin es necesario describir el marco en el que se producen estas pruebas dentro del seno de este equipo, presentando primero su historia, así como la competición que pondrá en juicio su trabajo llamada Formula Student.

Al final del texto se expondrán los resultados obtenidos, fruto de la recogida de información y de señales en el motor eléctrico e inversor de corriente. Se hará hincapié en el aumento de conocimiento que traen consigo acerca del comportamiento del tren eléctrico en comparación con el que el equipo poseía cuando se llevó a cabo el primer monoplace de índole eléctrica.

Abstract

It cannot be denied that the automotive industry is approaching a pivotal moment. A shift towards electric power train is coming motivated by greener government policies and greater public demand. Projects like ARUS offer students the chance to immerse themselves in a design and research challenge that puts them to work into a project with temporal, economical and technical restrictions as the ones they would surely find in their future jobs as well as expanding their knowledge in the uprising electric mobility field.

The present work aims to review the changes in the development of the tests on the electric powertrain inside the new single-seater concept conceived to compete in FSAE by ARUS team, also guiding through the learning process of the team that performed them. For this purpose, it is necessary to frame the history of this team as well as the competition organisation that will lastly judge their prototype called Formula Student.

By the end of the text the results of such tests will be exposed and it will be seen that the knowledge about the performance of the e-powertrain has been increased compared to the one the members had when the electric single-seater project was started, thanks to the information and signal gathering of the electric motor and current inverter.

Índice Abreviado

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
<i>Notación</i>	XI
1 Introducción	1
1.1 El equipo ARUS	1
1.2 La Formula Student	3
1.3 El ART-19e	4
1.4 La bancada de ensayo motor	5
2 Pruebas en vacío	23
2.1 Procedimientos y análisis previos	23
2.2 Resultados de las pruebas	30
3 Ensayos en carga	41
3.1 Ensayos con motor freno bloqueado	42
3.2 Ensayos tipo Acceleration	44
3.3 Cadena de consignas en Bamocar	49
3.4 Frecuencias de conmutación. Consigna en rotación	50
3.5 Potencia en todos los ensayos	52
3.6 Ajuste del control PI	52
4 Conclusiones y líneas futuras	61
4.1 Conclusiones	61
4.2 Líneas futuras	62
Apéndice A Gráficas del ensayo en vacío del 26 de marzo	67
A.1 Tensión de línea AB	67
A.2 Intensidades de fase A	68
Apéndice B Gráficas del ensayo en vacío del 10 de junio	79
B.1 Tensiones de fase A y C	79
B.2 Análisis FFT de la tensión de fase A	80
B.3 Análisis FFT de la tensión de fase A filtrada a 12 kHz	81
B.4 Análisis FFT de la tensión de línea AB	82
B.5 Análisis FFT de la tensión de línea AB filtrada	83
Apéndice C Gráficas del ensayo en carga tipo Acceleration. Representación temporal	107
C.1 Intensidades de fase A, B y C	107

C.2	Intensidades filtradas a 12 kHz	108
C.3	Tensiones de fase	108
C.4	Tensiones de línea	108
Apéndice D Gráficas del ensayo en carga tipo Acceleration. Análisis en frecuencia		129
D.1	Análisis FFT de las intensidades de fase	129
D.2	Análisis FFT de las tensiones de fase	131
D.3	Análisis FFT de las tensiones de línea	132
<i>Índice de Figuras</i>		137
<i>Índice de Tablas</i>		141
<i>Índice de Códigos</i>		143
<i>Bibliografía</i>		145
<i>Índice alfabético</i>		147
<i>Glosario</i>		147

Índice

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
<i>Notación</i>	XI
1 Introducción	1
1.1 El equipo ARUS	1
1.2 La Formula Student	3
1.3 El ART-19e	4
1.4 La bancada de ensayo motor	5
1.4.1 Estado del arte. Entornos de prueba motor en laboratorios	7
1.4.2 Configuración heredada	8
1.4.3 Los componentes del sistema tractor	11
El motor EMRAX-228 MV LC	11
Construcción interna del EMRAX 228 MV	13
El inversor Bamocar D3-700	16
El software NDrive y su configuración fundamental	17
El control de corriente y Bamocar	20
2 Pruebas en vacío	23
2.1 Procedimientos y análisis previos	23
2.1.1 La preparación previa. El autophasing	23
Análisis en Matlab	26
2.2 Resultados de las pruebas	30
2.2.1 Primer ensayo. 26 de marzo	30
2.2.2 Caracterización del bus DC. 4 de abril	32
2.2.3 Característica tensión-velocidad. 10 de junio	34
3 Ensayos en carga	41
3.1 Ensayos con motor freno bloqueado	42
3.2 Ensayos tipo Acceleration	44
3.2.1 Estudio de la potencia en el test	46
3.3 Cadena de consignas en Bamocar	49
3.4 Frecuencias de conmutación. Consigna en rotación	50
3.5 Potencia en todos los ensayos	52
3.6 Ajuste del control PI	52
4 Conclusiones y líneas futuras	61
4.1 Conclusiones	61
4.2 Líneas futuras	62
4.2.1 Monitorización del bus CAN e inclusión de más sistemas del ART en la bancada	62

4.2.2	Escalado en potencia y circulación bidireccional	63
Apéndice A	Gráficas del ensayo en vacío del 26 de marzo	67
A.1	Tensión de línea AB	67
A.2	Intensidades de fase A	68
Apéndice B	Gráficas del ensayo en vacío del 10 de junio	79
B.1	Tensiones de fase A y C	79
B.2	Análisis FFT de la tensión de fase A	80
B.3	Análisis FFT de la tensión de fase A filtrada a 12 kHz	81
B.4	Análisis FFT de la tensión de línea AB	82
B.5	Análisis FFT de la tensión de línea AB filtrada	83
Apéndice C	Gráficas del ensayo en carga tipo Acceleration. Representación temporal	107
C.1	Intensidades de fase A, B y C	107
C.2	Intensidades filtradas a 12 kHz	108
C.3	Tensiones de fase	108
C.4	Tensiones de línea	108
Apéndice D	Gráficas del ensayo en carga tipo Acceleration. Análisis en frecuencia	129
D.1	Análisis FFT de las intensidades de fase	129
D.2	Análisis FFT de las tensiones de fase	131
D.3	Análisis FFT de las tensiones de línea	132
	<i>Índice de Figuras</i>	137
	<i>Índice de Tablas</i>	141
	<i>Índice de Códigos</i>	143
	<i>Bibliografía</i>	145
	<i>Índice alfabético</i>	147
	<i>Glosario</i>	147

Notación

FS	<i>Formula Student</i>
FSG	<i>Formula Student Germany</i>
FSS	<i>Formula Student Spain</i>
MWRD	<i>Monorear wheel drive</i>
PMSM	<i>Permanent Magnet Synchronous Machine</i>

1 Introducción

Lo que tiene usted ante sí es un texto que pretende materializar y recoger todo el trabajo realizado durante la presente temporada 2018-2019 en el marco de las pruebas al tren eléctrico de potencia que propulsa al ART-19e. Si bien es muy complicado abarcar todo lo acontecido durante un año completo, se tiene como objetivo grabar en este proyecto muchos de los problemas, procedimientos y resultados que se han hallado, siendo ser el mayor logro que estas páginas pudieran lograr evitar que lo que fueron inconvenientes para un autor y su equipo lo vuelvan a ser para los próximos y próximas integrantes del equipo ARUS.

Los experimentos a realizar se sitúan en las instalaciones del depto. de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla con el fin de poner a prueba el tren eléctrico de potencia de un monoplaza de Formula Student. El trabajo desarrollado es claramente una continuación y complementación del realizado por F. Almagro [2] en su tesis final de máster y a la que recurriremos en multitud de ocasiones por no pretender ahondar en el diseño constructivo del sistema eléctrico que da vida a la bancada de ensayo. Definida más correctamente dentro de unas cuantas páginas, la llamada bancada es, en resumidas cuentas, una instalación donde poder probar el funcionamiento conjunto de motores eléctricos e inversores de corriente que los alimentan, monitorizar y verificar los sistemas. La principal misión es describir los ensayos realizados a fin de afianzar el conocimiento sobre el comportamiento de los elementos de potencia que será clave para predecir la actuación del coche en pista. A la vez también se pretende hacer al lector partícipe de la evolución del equipo humano realizó estos trabajos durante toda la temporada para así poder observar al mismo ritmo que ellos y ellas lo hicieron, la mejora en la rutina y metodología de toma de datos que dará sus frutos en los resultados que se irán mostrando.

Por resumir, las líneas del trabajo buscarán siempre conseguir los siguientes objetivos en orden de importancia:

- Verificar las características principales del motor y los parámetros más importantes en la configuración del inversor y explicar claramente la naturaleza de estos
- Ampliar y plasmar en el texto el máximo conocimiento posible a cerca de procedimientos, análisis de los datos obtenidos y límites de operación del banco de pruebas.
- Verificar en la medida de lo posible el comportamiento de las variables de control del inversor para mejorar el modelo dinámico del sistema tractor en Simulink.

Se necesita, no obstante, algo de perspectiva para entender quién es ARUS y por qué se pretende hacer lo hasta ahora descrito.

1.1 El equipo ARUS

ARUS Andalucía Racing es el equipo de competición de la Universidad de Sevilla y formado por más de 80 estudiantes de las diferentes facultades y escuelas de la institución. Este grupo humano dividido en 11 áreas del conocimiento toma parte en la competición de diseño automovilístico más importante a nivel universitario en el globo: la Formula Student. Cuando mencionamos este nombre hay que pensar en más de 600 universidades alrededor del mundo compitiendo en los diferentes eventos a lo largo del año para hacer mostrar que su monoplaza es el mejor. Así es, en esta competición se desarrolla el diseño, manufacturación y puesta en marcha de vehículos de competición y donde no tan sólo es valorada la actuación de éstos en

pista, si no que existen varias modos de obtener puntos que no implican necesariamente que el coche esté moviéndose.

Volviendo al equipo sevillano, hasta hace tan sólo un año, contaba en sus espaldas con cuatro monoplazas de combustión interna llamados ART's. Desde 2014 a 2017 el proyecto fue creciendo para convertirse en una asociación mediática y reconocida por su universidad y dejar de ser un grupo reducido grupo de personas que se embaucaron en una aventura casi imposible de construir un coche de carreras. El esfuerzo, sacrificio y tenacidad, estandartes indiscutibles del equipo, han hecho que a día de hoy se cuente con 8 monoplazas contruidos compitiendo al más alto nivel europeo y mundial. En efecto, desde la temporada 2018 ARUS dejó de participar únicamente en la categoría de combustión para dar el salto a la Formula Student Electric con su primer prototipo "propulsado" por litio, el ART-18e. En ese momento los y las sevillanas se convirtieron en el único equipo español en participar en las dos categorías principales (título que a día de hoy aún se conserva) con todo lo que ello conllevó en el ámbito logístico, humano y financiero. Con un presupuesto considerablemente menor al de sus competidores europeos, ARUS empezó a poder competir propiamente dicho con su ART-17 y se ha mantenido ahí gracias a la inventiva de sus miembros que han sabido siempre encontrar soluciones técnicas no comerciales a los problemas que un proyecto de estas características plantea haciendo valer el talento de los y las jóvenes que lo conforman. Todo esfuerzo tiene su recompensa, llegando en la presente temporada un merecido tercer puesto en el Autox en el circuito de Assen, prueba que se describirá más adelante.

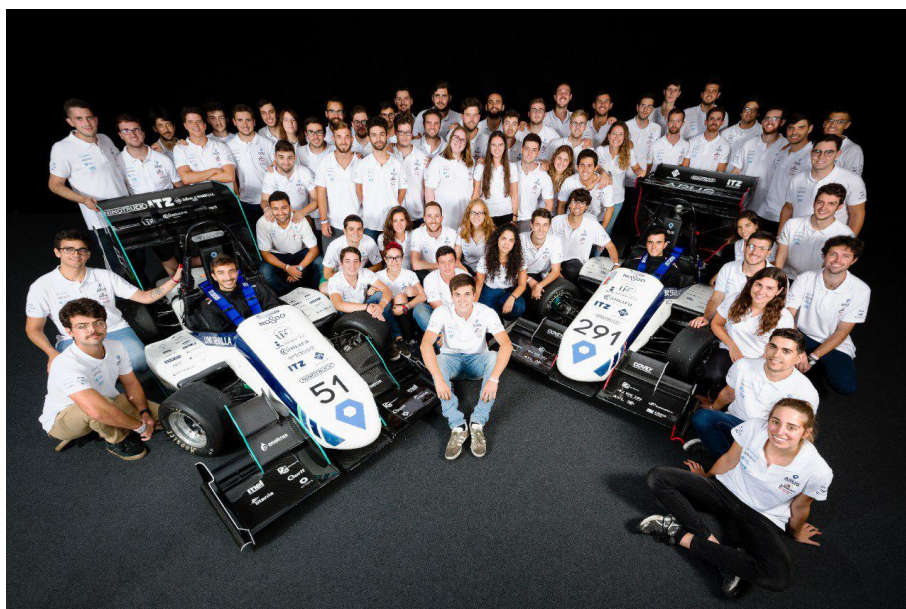


Figura 1.1 Asistentes de ARUS a FSG posando junto con el ART-19e (izquierda) y el ART-19c (derecha) en la foto oficial en el circuito del Hockenheimring. Fuente: propia.

El autor comenzó sus andanzas en la temporada 17-18 como miembro del departamento de electrónica, justo con la puesta en marcha del diseño del primer vehículo eléctrico, y al encargo planificar la fabricación del cableado del vehículo para la interconexión de los sistemas electrónicos. Fueron casi innumerables los contratiempos encontrados, pero principalmente fallos en los sistemas electrónicos que gobiernan la puesta en tensión del acumulador de energía hicieron que no pudieran superarse las inspecciones técnicas impuestas por la competición. Un inicio nuevo de temporada, ya como cofundador de un nuevo departamento, el de E-Powertrain, me brindó la oportunidad de situarme al cargo de la bancada de ensayo motor. Es precisamente la reestructuración del ala eléctrica del equipo donde subyace un mejor funcionamiento este año. Con un coche que no había competido pero con la experiencia de un primer año y mucho feedback bajo el brazo, el reparto de tareas se realizó de mejor manera que en la pasada temporada, distinguiéndose esta vez entre tareas de "alto" y "bajo" voltaje.

Aún así, son los dos departamentos, el de E-Powertrain y Electrónica, los caballos de batalla que hacen de cuello de botella para la puesta del vehículo eléctrico en la pista de una competición. Esto es así por la falta de experiencia en el terreno de la movilidad eléctrica de los miembros del equipo y la gran diferencia en complejidad con los problemas a resolver en su homónimo de combustión, que tienen una curva de

aprendizaje mucho mayor. El objetivo de tener un monoplaa completamente pulido es una tarea que a muchos equipos les lleva del entorno de cinco años hasta que superan, siquiera, su primera inspección técnica de batería. ARUS lo ha hecho en dos.

Dicho por muchos jueces de las competiciones, se ve en ARUS algo especial. Puede que sea que sus miembros no están impulsados por ningún motivo económico, y los monoplaas son únicamente fruto de su pasión por la ciencia y la competición. Quizá influya la gran formación que, sin darnos cuenta tal vez, hemos recibido en nuestra universidad que, dicho por miembros de la competición nos hace tener un conocimiento científico excepcional de los sistemas que conforman nuestros coches y que, por cierto, puede estar potenciado en el ámbito eléctrico por ser el **único equipo español con una bancada de ensayo propia y no comercial**. Sea cual sea el por qué, tal vez lo que ARUS necesitaba era un poco más de experiencia y rodadura en la construcción de vehículos eléctricos para dominar la técnica y poder pasar sin problemas en años venideros las inspecciones técnicas de la competición. Les observaremos desde cerca.



Figura 1.2 Miembros del equipo, amigos, en mitad de la inspección técnica de la batería en Montmeló que finalmente sería superada . Fuente: Redes sociales de FSG.

1.2 La Formula Student

La Formula SAE, también conocida mundialmente como Formula Student (FS), es una competición con origen estadounidense que nace de la mano de la *Society of Automotive Engineers (SAE)* para dar cabida al diseño de monoplaas de competición en las universidades americanas, celebrándose el primer certamen en la universidad de Austin, Texas. Desde entonces fue evolucionando hasta llegar a convertirse en el concepto que conocemos hoy en día, que puede resultar llamativo por no hacer que sus coches corran en grupo por ver quién es el primero en terminar un circuito, si no que consta de diferentes pruebas, dinámicas y estáticas. La competición líder a nivel mundial resulta ser la que acoge el circuito de Hockenheim, en Alemania llamada *Formula Student Germany (FSG)*, que posee incluso su propia reglamentación [8] que se complementa con la americana y en la que las demás competiciones europeas se basan.

De la ingente cantidad de participantes que se observa en la imagen 1.3 se deduce que semejante evento no podría realizarse de no contar con el apoyo de patrocinadores de la talla de Audi, Mercedes, Tesla, Bosch, Siemens y un largo etc de empresas internacionales que muestran su interés por esta clase de escaparate de talento universitario, tan codiciado en el sector privado. La competición tiene por tanto reputación de ser una de las más complicadas del planeta, donde sólo los vehículos verdaderamente aptos para correr logran poner una rueda en pista, previa superación de unos exámenes de acceso que sirven de criba para asistir a la competición. En la categoría eléctrica esto se traduce en muchísimas más horas de inspecciones para asegurarse que el monoplaa no supone ningún riesgo para la salud de los que le rodean. Únicamente cuando se han superado los "scrutineerings" (de su nombre en inglés) de la batería, el de los sistemas eléctricos de bajo y "alto voltaje" (no en el sentido normativo que en Ingeniería Eléctrica estamos acostumbrados), además de la inspección mecánica, es cuando los coches pueden participar en los eventos dinámicos, que son cuatro.



Figura 1.3 Equipos participantes en FSG 2019 en la foto oficial en el circuito de Hockenheim. Fuente: Redes sociales de FSG.

- *Acceleration*: se mide la capacidad del monoplaza para recorrer 75 m en línea recta en el menor tiempo posible, siendo una de las más exigente en cuanto a potencia punta.
- *Skidpad*: el monoplaza debe trazar dos circunferencias a la derecha y dos a la izquierda para completar el trazado y poner a prueba su comportamiento dinámico lateral.
- *Autocross y Endurance*: la primera consiste en dos vueltas rápidas a un circuito y sirve de clasificatoria para la segunda, que consiste en recorrer 22 km en el mismo circuito y donde se saca a relucir la capacidad de aguantar y fiabilidad del monoplaza. Muy pocos consiguen acabarla.

Es con la vista en estas pruebas dinámicas para las que se ha de diseñar el tren eléctrico de potencia el monoplaza eléctrico de ARUS. Sin embargo, el conocimiento del equipo acerca del proyecto que han desarrollado se mide en las llamadas pruebas estáticas. La elaboración de un plan de negocio es clave para que cualquier idea en el mundo de la ingeniería vea la luz y por tanto hay todo un departamento en ARUS dedicado a la elaboración del *Business Plan* que recoge estudios de viabilidad, económico-financieros y de alcance para convencer a un jurado de que su proyecto es quien merece la inversión (ficticia, claro está). En esta prueba todas las universidades están al mismo nivel y miden su talento humano, donde ARUS ha destacado notablemente en los últimos dos años acumulando tres primeros puestos 'first overall', muestra del potencial del equipo. Por otro lado, el control de costes y procesos es un factor clave para la producción de un proyecto de la envergadura del nuestro y en las competiciones se ve representado por la prueba del *Cost & Manufacturing* donde los jueces pueden preguntar sobre el aspecto constitutivo de cualquier parte del vehículo. Por último, la imagen 1.4 muestra a miembros del equipo, entre ellos el autor de este texto, siendo examinados por diferentes jueces especializados en distintos ámbitos de la industria sobre el diseño y la manufacturación de los componentes de nuestros subsistemas en el *Design event* para comprobar si el monoplaza tiene una lógica común.

1.3 El ART-19e

Herederero directo del primer monoplaza eléctrico, el ART-18e, posee pocos cambios en cuanto a su concept, pero los pocos existentes son profundos. Sigue siendo un monoplaza de primer año en espíritu, con un sólo motor trasero en configuración *MRWD* con un inversor comercial sin sistemas adicionales de monitorización y sensorización, y es que debe de ser así, pues el equipo aún no ha conseguido dominar la técnica de los vehículos eléctricos, por lo que se ha de ser cauteloso e innovar en lo imprescindible necesario. Es el caso del acumulador de energía.

Tras un scrutineering, más bien, una charla en privado con jueces FSS en Montmeló la pasada temporada, su veredicto fue que el equipo había logrado un primer pack de baterías impresionante si se tenía en cuenta que era la primera vez que participábamos en la categoría, pero que obviamente aún tenía mucho que recorrer para poder portar la pegatina que muestra su certificación por la competición. Es por ello que el principal

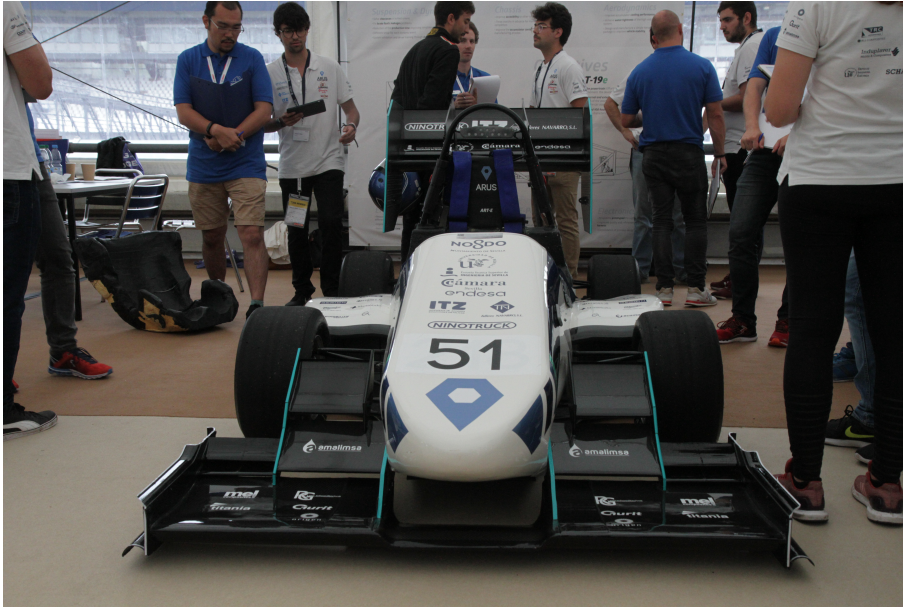


Figura 1.4 Miembros de ARUS en la prueba estática del Design junto al ART-19e. Fuente: propia.

cambio interno en el nuevo monoplaza es el rediseño del *container*, que designa al conjunto de estructura que contiene los segmentos de la batería (o 'stacks') y la propia parte de potencia eléctrica. Aprovechando la remodelación, la tensión se incrementó a los 453.6 V máximos, portando la nueva batería una configuración 108s6p (con 4 stacks de 24s2p y uno de 12s2p), lo que también afectó al sistema de gestión de temperatura y tensión de la batería. El sistema de monitoreo de la batería, el *BMS*, es íntegramente diseñado y construido por los miembros del departamento de electrónica, con una arquitectura maestro-esclavo, tiene dispuestas un total de 8 pcb's sobre los stacks que leen los valores de tensión y temperatura de todas los puntos eléctricos provenientes de las placas de sensorización. Un mejor diseño era necesario en este punto también para acomodar los esclavos y disponerlos sobre los stacks además de hacer que las pcb de sensorización de las celdas también sufrieran severos cambios con respecto al año pasado. El resultado es el que se puede apreciar en la figura 1.5 donde pueden apreciarse un stack y detalles del interior del acumulador. Hay que hacer notar que con este diseño, mucho más optimizado que el del año pasado se logró reducir el tiempo de ensamblado de las celdas de casi un mes a 2 días. Se deja al lector encargado de imaginar el salto de calidad producido.

Con esto se presenta en la figura 1.6 un plano lateral del monoplaza que hacen más que evidentes algunos cambios que no hemos mencionado, como la notable presencia de un paquete aerodinámico, diseñado y fabricado también íntegramente por el equipo, además de otros cambios no visibles como la adaptación del chasis para una mejor introducción de la batería en el vehículo, un circuito de refrigeración del acumulador más optimizado, un diseño con dos bombas para la refrigeración del motor y el inversor, etc. En general el conocimiento sobre el monoplaza en el equipo va en aumento. Así lo ha hecho también en el departamento de E-Powertrain con las pruebas en bancada.

1.4 La bancada de ensayo motor

La necesidad de comprobar el correcto funcionamiento de los sistemas de potencia que aparecen en la figura 1.7 era más que evidente la pasada temporada. El completo desconocimiento de los miembros del equipo acerca del comportamiento del motor y el inversor eléctricos hacía mirar con recelo la posibilidad de instalarlos directamente en el coche por cuestiones de seguridad. Es así, fruto de esta carencia de conocimiento, como nace el concepto de bancada eléctrica en ARUS.

Por concesión de un espacio por parte del depto. de Ingeniería Eléctrica de la ETSI en sus instalaciones, ARUS disfruta de la posibilidad de ensayar el conjunto motor-inversor bajo tensión alimentados por una apartamenta diseñada por F. Almagro [2] y cuya implementación se discute en su TFM ampliamente. No nos extenderemos mucho en el diseño íntimo de toda la apartamenta y dispositivos que dan vida al sistema, pues este era precisamente el objetivo del mencionado trabajo de mi predecesor y dado el hecho de que

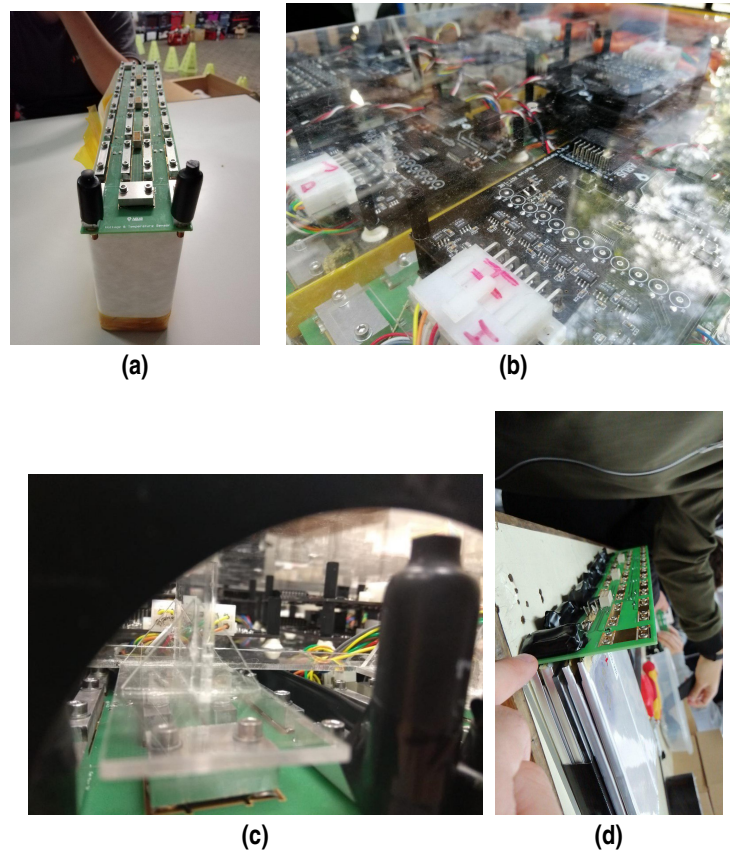


Figura 1.5 Stack de la nueva batería del ART-19e y diferentes detalles de la estructura de metacrilato sobre la que yacen los BMS esclavos También se muestra un stack en proceso de ser ensamblado. Fuente: Propia.

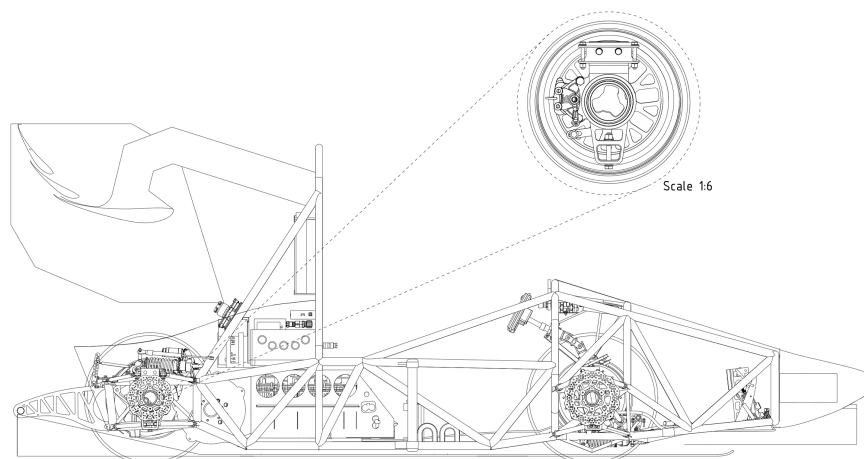


Figura 1.6 Plano lateral del ART-19e. Fuente: Propia.

ningún cambio sustancial se ha llevado a cabo bajo mi mando en el sistema como tal salvo, quizá algunas operaciones de mantenimiento y reparación, no merece la pena volver a describirlo.

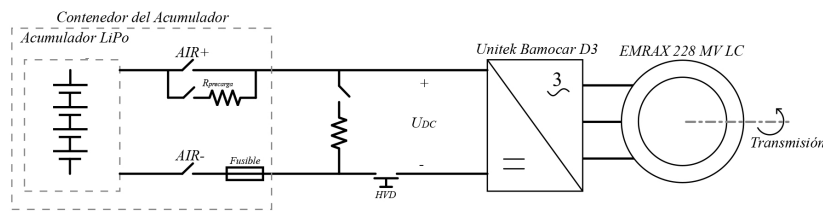


Figura 1.7 Tren eléctrico de potencia del ART-19e. Fuente: propia.

1.4.1 Estado del arte. Entornos de prueba motor en laboratorios

Seguimos sin tener cercada la definición de bancada eléctrica y es que, en realidad, es un concepto amplio ya que su ejecución tiene varias arquitecturas. En general, un banco de pruebas es aquel entorno que proporciona unas ciertas entradas al sistema a probar que son lo más parecidas a las que se encontrará en la realidad y que permite capturar sus salidas para su análisis. El lector podría de inmediato pensar en los bancos de rodillos que pueden encontrarse en algunos talleres mecánicos de ciudad, en el final de la línea de fabricación de los fabricantes de coches o incluso en las revisiones de la ITV, donde el vehículo rueda sobre estos rodillos, que simulan una carga opuesta al movimiento para estudiar el comportamiento del coche. Esto se ajusta a la definición de banco de pruebas, pero para nuestra situación, implicaría que todos los sistemas se encontraran en una fase avanzada del desarrollo para poder permitirse que se instalasen en el ART y ser testeados in situ. Debido a que la fase de desarrollo se dilata en el tiempo, en nuestra situación es mucho más conveniente poder llevar a cabo pruebas exclusivamente en el tren de potencia. No obstante, si se piensa que el uso de este tipo de bancadas con rodillos es imposible para nuestros monoplazas, no tiene más que observar la imagen 1.8 que muestra al ART-18c antes de ser desmantelado esta misma temporada siendo puesto a pruebas sobre unos rodillos al que pronto esperamos poder llevar a su hermano eléctrico.



Figura 1.8 El ART-18c siendo puesto a prueba en un banco de rodillos. Fuente: Propia.

La topología más básica que suele ser la elegida en muchos laboratorios de investigación (y que es la elegida para la bancada de ARUS) es la presentada por R.M. Schupbach consistente en el motor a probar conectado mediante un eje mecánico al llamado dinamómetro [16], que se trata de otra máquina con capacidad de actuar como motor o generador que simulará la dinámica vehicular y los pares opuestos al movimiento. Todo ello puede controlarse y ser monitorizado por una controladora, que en el caso del esquema mostrado en la 1.9 es una dSPACE. Lo interesante es poder tener el control sobre los drivers de las dos máquinas, puesto que en el caso del motor, estamos interesados en monitorizar su comportamiento, pero por el lado del dinamómetro, su control nos abre las puertas a simular cualquier situación que pudiésemos encontrarnos en la carretera, como por ejemplo los perfiles estandarizados *UDDS* americano y *10-15 Mode* japonés que simulan perfiles de pares que el vehículo podría encontrarse en la calzada. Esta ventaja no la encontramos en los sistemas

donde el dinamómetro sea de menor potencia y se añada al eje un volante de inercia.

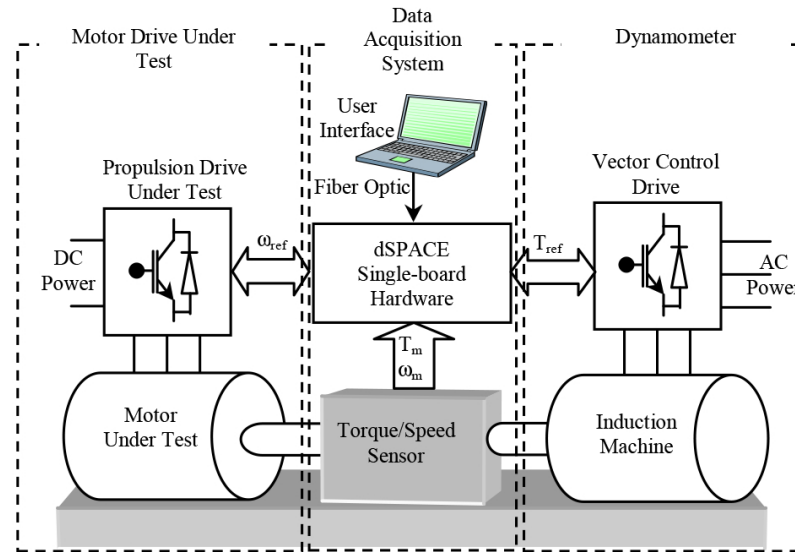


Figura 1.9 Topología típica de los bancos de ensayo basados en dinamómetros. Fuente: [16].

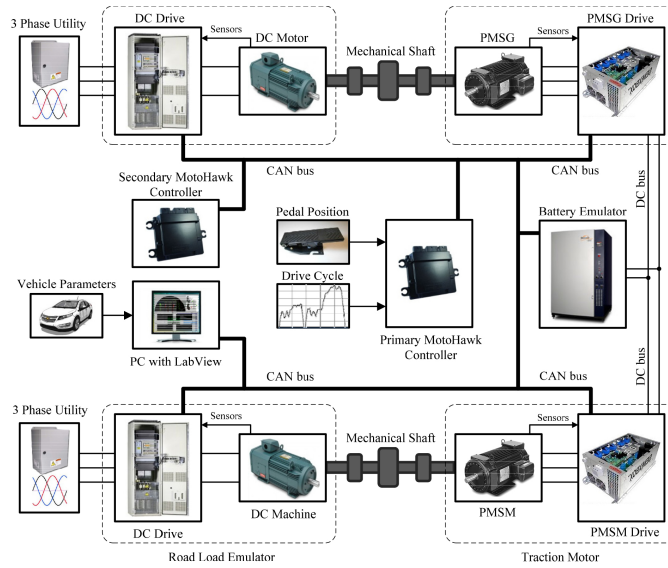
El interés por la construcción de este tipo de sistemas ha sido potenciado en parte por el boom de la movilidad eléctrica en la última década que ha llamado la atención de las universidades por la multitud de campos aún por explorar: modelos matemáticos, construcciones alternativas de motores PMSM, bucles de control predictivos sin feedback, etc. Por ejemplo, adicionalmente al simple monitoreo las señales del motor eléctrico, un paso de madurez lo supone la construcción de un *HIL* (*Hardware in the Loop*), que permite el prototipado rápido de los sistemas electrónicos y el powertrain, solución que ahorra muchísimo tiempo y dinero. Otro interés que tienen las bancadas de ensayos es la posibilidad que ofrecen trazar un mapa de eficiencias mediante el uso de analizadores de potencia para poder determinar en qué configuraciones el motor trabaja mejor. Si bien estas medidas y arquitecturas mencionadas añaden una dificultad inasumible en el punto en el que ARUS se encuentra, nunca hay que perder de vista cuáles son los siguientes pasos a llevar a cabo en el diseño del sistema.

Ahora el lector puede situarse mejor en la topología que trataremos en los siguientes capítulo y puede comprender así la forma que tomó la bancada del equipo.

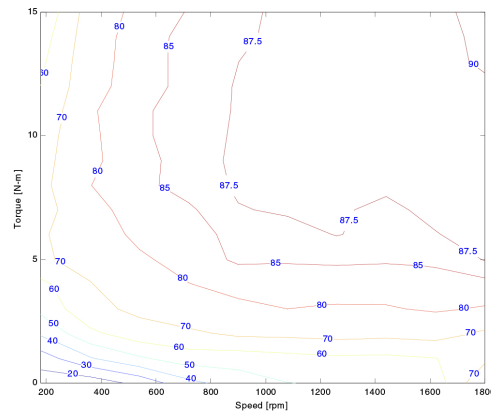
1.4.2 Configuración heredada

Como ya se ha llegado a mencionar en el presente texto, el diseño de la instalación de la bancada de ensayo es heredado y fruto de varias generaciones de artífices. La principal reforma fue la acometida por Fernando Almagro Yravedra que fue plasmada en su completísimo trabajo final de Máster [2]. De este texto podemos extraer la configuración que permanecerá intacta durante toda la temporada en la figura 1.11. Las tablas 1.2 y 1.3 recogen la información de los componentes de potencia de la instalación y dan al lector una idea de las limitaciones de cada aparato, a la vez que deja entrever cuál será el limitante cuando nos propongamos explotar el sistema bajo carga.

Efectivamente, comprobamos que no hay ningún problema por parte del inversor del *ART-19e* pues es capaz de demandar una potencia de 280 kW de forma puntual y 140 kW de manera nominal sin ningún problema. En contraposición, nos encontramos con el rectificador DC/AC, que sólo podrá extraer 16 kW de la red de manera nominal y, además, de forma unidireccional, es decir, inyectando potencia desde la red al banco. Esto último puede extrañar y preocupar, pues es un detalle de gran importancia para entender muchas de las decisiones tomadas y los regímenes de trabajo escogidos para poner a pruebas los elementos. El sistema construido presenta una topología de bucle cerrado en potencia, esto es, una vez introducida la energía por el rectificador, esta fluirá desde el *EMRAX 228* hacia la otra máquina síncrona que actúa de dinamómetro, el *BLS-192*, cuando, por ejemplo, nos encontremos en un régimen de aceleración por parte del motor del equipo. Hasta aquí no hay problema alguno, pues el flujo ha sido desde la red hacia las máquinas y cuando se alcance una velocidad constante, el motor y el freno se encontrarán en equilibrio de potencias.



(a)



(b)

Figura 1.10 Arquitectura más compleja implementando un HIL con una red CAN y dos ejes mecánicos en funcionamiento. Ejemplo de medición del mapa de eficiencia motor. Fuente: [16].

Sin embargo, ¿qué ocurriría si se deja de consumir potencia por parte del motor? Esta situación corresponde a aquella donde el piloto deja de pulsar el pedal de aceleración, pero tampoco pulsa el de freno, es decir, el motor no consumiría potencia y quedaría a rotor libre. La situación terminaría con el vehículo completamente parado tras haber sido frenado por las fuerzas de rodadura y fricción aerodinámica, las no idealidades del sistema. En lo que afecta a la bancada, si bien el motor no consumiría potencia alguna, el freno seguiría enviando un flujo de potencia negativo al bucle. Esta potencia remanente en el bucle puede llegar a consumirse destinada a pérdidas mecánicas y eléctricas del conjunto, pero también podría necesitar ser evacuada hacia la red. Todo dependería del ritmo o la dinámica de consumo por parte de las pérdidas.

Estas y otras situaciones plausibles que pueden encontrarse en una bancada de bucle cerrado están recogidas en la tabla 1.1.

Sigamos razonando con algo parecido, pero más crítico, ocurre cuando se desea frenar a una tasa mayor que la que las fuerzas de la naturaleza, las ya mencionadas rodadura y aerodinámica, ofrecen. Es aquí cuando el piloto, además de soltar el pedal acelerador, pulsaría el freno añadiendo así aún más par contrario al movimiento y, ocasionalmente, parando el vehículo. En la realidad este par se origina en las pinzas de freno, siendo la potencia que deben satisfacer para parar el vehículo un parámetro de diseño. El equivalente en la bancada se traduce en que el par contrario al movimiento comandado al motor freno sería mayor. Teniendo en cuenta que $P_{freno} < 0$, si $P_{bucle} > P_{freno}$ en ese momento, la red deberá aportar un flujo positivo de potencia,

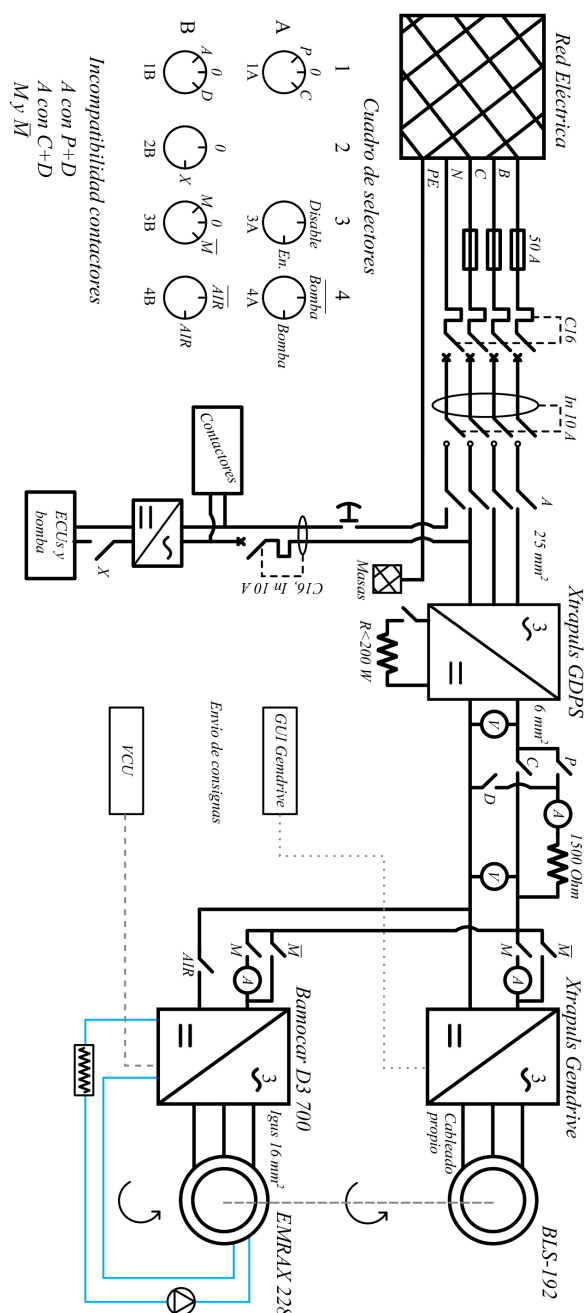


Figura 1.11 Esquema multifilar al detalle del sistema eléctrico del banco de ensayo. Fuente: [2].

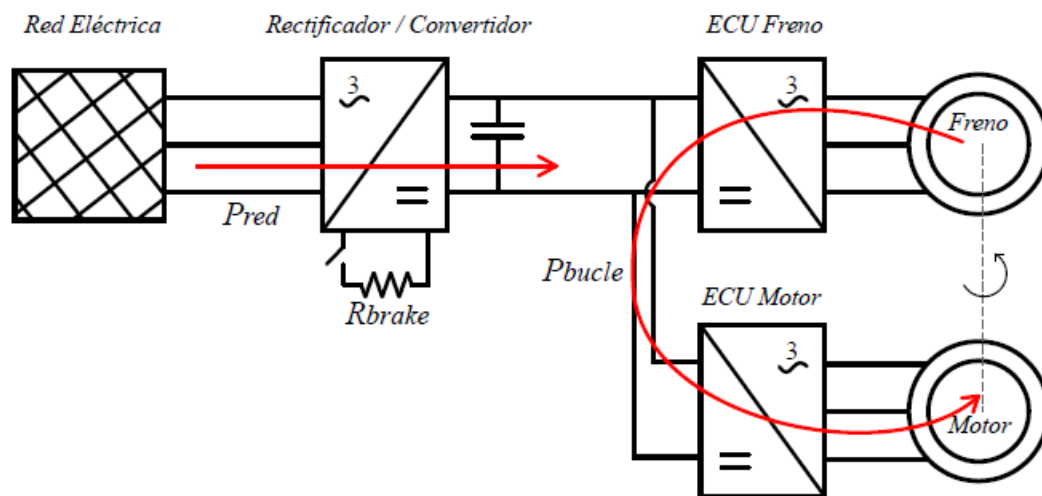
pero, si por el contrario $P_{buble} < P_{freno}$, esto significaría que el motor freno tiene potencia suficiente para llevar el eje a velocidad nula y el resto de la energía deberá ser evacuada.

El rectificador de cabecera utiliza un puente de diodos para convertir la tensión trifásica industrial de la red y construir el bus DC del que cuelgan los dos inversores. Como el lector habrá podido ya deducir, a este dispositivo le resulta imposible evacuar un flujo negativo de potencia, de vuelta a la red. Si bien se cuenta con una resistencia de frenado (*ballast o brake resistor*), ésta es sólo activada cuando en el bus se alcanzan los 800 V y tan sólo podrían disiparse 200 W según la información proporcionada por el fabricante [9]. Aún teniendo varios niveles y dispositivos de seguridad, siempre es arriesgado llegar a los límites que el fabricante indica en su hoja de datos, sobre todo cuando estos conllevan superar el límite de aislamiento eléctrico para el que está certificado el producto. Además, la potencia que la resistencia de frenado puede evacuar resulta insuficiente para asegurar que la tensión en cabecera no crecerá sin control.

Otro problema podría venir dado por sobrepasar los límites por sobre intensidad de las protecciones o para

Tabla 1.1 Posibles estados en la potencia del bucle cerrado en función del régimen motor. Fuente: [2].

Régimen	Motor	Freno	Pbucle	Pred
Arranque	<i>Consume</i>	<i>No genera</i>	0	$0 <$
Tracción Constante	<i>Consume</i>	<i>Genera</i>	$0 <$	$0 <$
Tracción Creciente	<i>Consume</i>	<i>Genera</i>	$0 <$	$0 <$
Tracción Decreciente	<i>Consume</i>	<i>Genera</i>	$0 <$	<i>Depende</i>
Paro	<i>No consume</i>	<i>Genera</i>	$0 <$	$0 >$
Frenada Constante	<i>Genera</i>	<i>Consume</i>	$0 >$	$0 <$
Frenada Creciente	<i>Genera</i>	<i>Consume</i>	$0 >$	$0 >$
Frenada Decreciente	<i>Genera</i>	<i>Consume</i>	$0 >$	<i>Depende</i>

**Figura 1.12** Bucle de potencia de la bancada de pruebas.

los que los dispositivos están diseñados. Lo primero no es preocupante, pues es para lo que están ahí esas protecciones, no obstante, lo segundo vuelve a comprometer la integridad del equipamiento de la instalación. Los límites que se deciden imponer para quedarnos bien lejos de la zona de operación nociva se discutirán más adelante en este trabajo, cuando se aborde el diseño de los ensayos.

Hasta ahora no se ha hecho más que empezar a abordar el problema de que el banco de pruebas, por su propia construcción podría quedar destruido, al menos parcialmente, si no se toman las medidas necesarias y se procede al planteamiento de los ensayos con gran cautela. Al autor le ha parecido conveniente abordar este tema lo antes posible dado que es aquí donde radican las decisiones tomadas. La seguridad ante contingencias eléctricas de los equipos, pero sobre todo de las personas que participamos en la maniobra y explotación de la bancada son asuntos de capital importancia. Es por ello que ante cualquier atisbo de duda ante el proceder de un ensayo u operación en tensión el sistema es detenido y rápidamente se pide opinión a los responsables del laboratorio del Departamento.

Abordemos ahora la descripción de los componentes que formarán parte del ART-19e, dejando a un lado la máquina síncrona que actúa como dinamómetro (o 'motor freno') cuya información fundamental se incluye en la tabla 1.2 y también el rectificador de cabecera y el inversor del dinamómetro que tienen su información principal recogida en la tabla 1.3.

1.4.3 Los componentes del sistema tractor

El motor EMRAX-228 MV LC

Continuando con la presentación de los componentes principales del sistema, llega el turno de introducir al que bien podría ser el protagonista del ART-19e, el EMRAX-228. Estas siglas esconden tras de sí las palabras *Electric Motor Axial Flux* (siendo la R en honor al CEO de la empresa, Roman Sušnik). Esta máquina

que puede actuar tanto como motor como generador (y al que nos habituaremos a llamar *motor* pues en ningún momento pasará a ser generador al no implementarse la frenada regenerativa) se trata de un *PMSM* (*Permanent Magnet Synchronous Machine*). Son muchas las investigaciones y papers en los últimos años que se centran en este tipo de máquinas debido a su atractivo rango de eficiencia, una de sus características estrella, y a las similitudes que guarda con las máquinas *BLDC* (*Brushless DC*), lo que propone un amplio abanico de técnicas de control que pueden ser desarrolladas y mejoradas.

Nos encontramos ante un motor diseñado en sus principios para el mundo de la aviación a pequeña escala, dando vida a planeadores y helicópteros, llegando a ser la máquina elegida para ir montada en el *Apis EA2*, que en 2008 ejecutó el 3er vuelo "eléctrico" mundial. El motor esloveno ha sido testado para pasar las exigencias de la industria aeronáutica, volviéndose muy popular para ser usado también por los equipos de Formula Student como muestra la figura 1.13 que, como ARUS, deciden dotar a su monoplaza con una configuración MRWD o incluso DRWD. Su alta densidad energética de entorno 10 kW/kg y alta eficiencia, junto con la posibilidad de ofrecer un gran par a velocidades relativamente bajas le han colocado como opción preferente para los equipos de competición FSAE, donde la tracción prevalece sobre la velocidad punta en la mayoría de ocasiones.

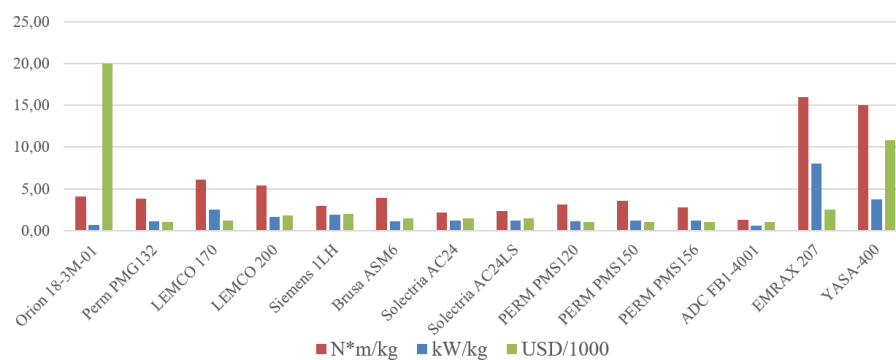


Figura 1.13 Motores utilizados en Formula Student por los demás equipos. Fuente: [11].



Figura 1.14 Motor EMRAX propulsando al Apis EA2.

Fue adquirido en la temporada 2017-18 para formar parte del primer monoplaza eléctrico del equipo al ser el candidato más favorable para trabajar en conjunción con el inversor *Bamocar D3-700* después de un proceso de selección y descarte mencionado en [2]. Si uno se adentra y escudriña qué configuración montan otros equipos de Formula Student que posean uno o dos motores en el eje trasero, se puede descubrir que la gran mayoría ha elegido, al menos en sus inicios, la marca *EMRAX* debido a que se obtienen facilidades para controlarlo usando el ya mencionado inversor. Nuestro modelo se corresponde con la versión *medium voltage & liquid cooled*. Lo primero asegura que se pueda trabajar con el rango de voltaje que ofrecerá la batería de

este año, de 453.6 V nominales, línea de diseño que no pretende ser cambiada de aquí a dos años vista. Lo segundo ofrece una buena solución, a medio camino entre la refrigeración única por aire y la combinada aire-líquido que el fabricante propone en su catálogo y bastaría con los 12L/min de agua a menos de 50°C como indica el manual para mantener el calentamiento durante la marcha del motor a raya, teniendo siempre en mente no sobrepasar los 120°C críticos para los enrollamientos.

En la tabla 1.2 ya se han dejado entrever los principales parámetros que el fabricante ofrece. Como objetivo de esta temporada se propuso validar en la medida de lo posible estos datos en el banco de ensayo ya que ello trae consigo varios puntos de interés:

- Seguir validando la bancada de pruebas. Tras los últimos tests que pudieron realizarse el año pasado, había que volver a revisar y poner a punto el sistema, lo que más tarde permitiría ir anotando sus limitaciones y aumentaría el conocimiento de los ingenieros del equipo acerca de sus puntos fuertes y de mejora, lo que ayudaría sin duda a aumentar la fiabilidad del sistema.
- Conocer el comportamiento del motor. El fabricante siempre es optimista y redondea los valores a la alza, pero es de gran interés conocer si la máquina es tan buena como se dice. A esto último podría llamársele validación del diseño, un punto que luce mucho en las competiciones de Formula Student y demuestra madurez y consistencia en el equipo.
- Enriquecimiento del modelo. Al estar otros miembros del departamento de E-Powertrain desarrollando en paralelo un modelo de simulación del tren eléctrico del monoplaza, es fundamental que en última instancia se parezca a la realidad. Esto puede conseguirse si el modelo es realimentado por resultados obtenidos de pruebas reales, que en este caso, servirían para obtener un mejor modelo matemático de motor.

Construcción interna del EMRAX 228 MV En la página web de Ben Katz [10] pueden encontrarse estas fotos mostradas en 1.15 y 1.16 que muestran en detalle la construcción interna de la máquina síncrona y que el autor no se ha podido resistir a incluir en esta memoria.

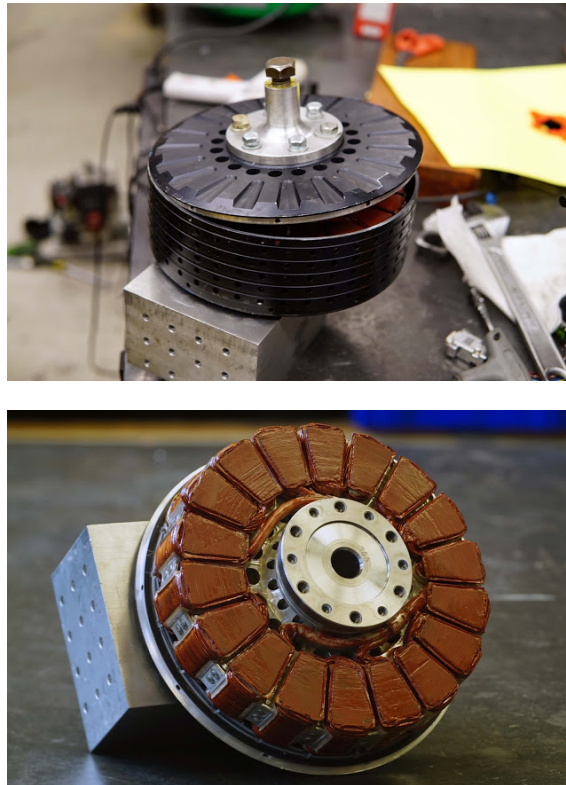


Figura 1.15 EMRAX 228 LV mostrando su interior. Fuente: [10].

En la ya mencionada tabla 1.2 se resumen los principales parámetros que EMRAX define en su hoja de características [6] y que el autor recomienda leer en profundidad si desea tener una comprensión completa

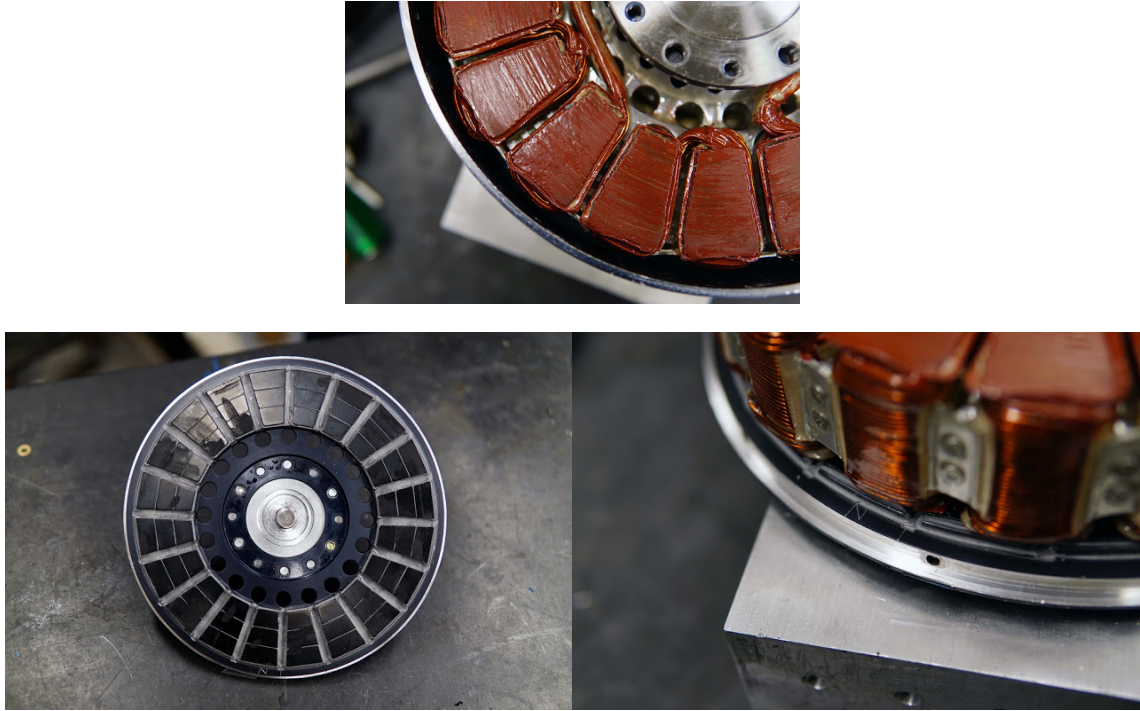


Figura 1.16 Detalle del bobinado y los imanes permanente de un EMRAX 228 LV. Fuente: [10].

del motor. Como puede comprobar, hay algunos parámetros que merecen una aclaración ya sea porque a priori carecen de sentido físico o porque no se explican por sí mismos. Se recomienda consultar a partir de ahora las figuras 1.17 para acompañar las aclaraciones.

- **La tensión máxima de entrada V_{rms}^{in} .** El fabricante ha decidido dar la información de la tensión máxima de aislamiento en el motor en DC. Esto puede parecer chocante al principio, pero tiene una posible interpretación, debiendo conocer primeramente que el motor está pensado para ser controlado mediante la técnica *Sine PWM* (o *SPWM*). Una vez conocida esta técnica de control de la conmutación, suele poderse establecer una relación entre la tensión en continua de entrada y la tensión trifásica de línea a la salida del inversor [18]. Para nuestra técnica de conmutación la relación es 1.1

$$V_{DC} = \frac{\sqrt{2} \cdot 2}{\sqrt{3}} \cdot V_{rms}^{linea} \approx 1.6330 \cdot V_{rms}^{linea} \quad (1.1)$$

De esta forma, según los datos del fabricante, la tensión de línea a no superar sería **287.815 V de línea**. Sin embargo, el rectificador de cabecera, si se recuerda, creaba un bus de $570V_{DC}$ nominales que según lo anterior, superaría en unos 60 voltios la tensión trifásica máxima recomendada. Esta misma cuestión ya fue discutida el año pasado con EMRAX [2], concluyendo con la explicación del fabricante de que la máquina estaba diseñada para trabajar en ambientes industriales, donde la tensión máxima puede ser superada con creces en ciertas ocasiones. Teniendo este hecho en cuenta, junto con que modo de funcionamiento del motor en el sistema no será continuo, el fabricante concluyó que no debería existir ningún desgaste excesivo por superar la tensión especificada en el datasheet.

- **La tensión máxima alcanzable.** Aprovechamos este inciso para hacer comprender que muchos de los parámetros en la columna de valores máximos se corresponden con magnitudes que pueden ser alcanzadas tan sólo por unos segundos (del entorno de 10 segundos por norma general) y que, por tanto, en las hojas de características de las máquinas electromecánicas suelen aparecer bajo el nombre de *valores pico*. Al tanto por ciento de esta magnitud con respecto a la nominal y al tiempo que pueda mantenerse el régimen en el tiempo, se le conoce en la literatura como *overload capacity* [5]. Es el caso del régimen de 6500 rpm que el motor puede alcanzar durante unos segundos antes de destruirse por fatiga mecánica y, por otro lado, los 5500 rpm donde podemos situarnos sin problema de forma nominal hasta que algún otro fenómeno, como el aumento de la temperatura del bobinado, nos lo impida. Consultar 1.17. Adelantamos ya que las aplicaciones de alta velocidad quedan fuera del interés

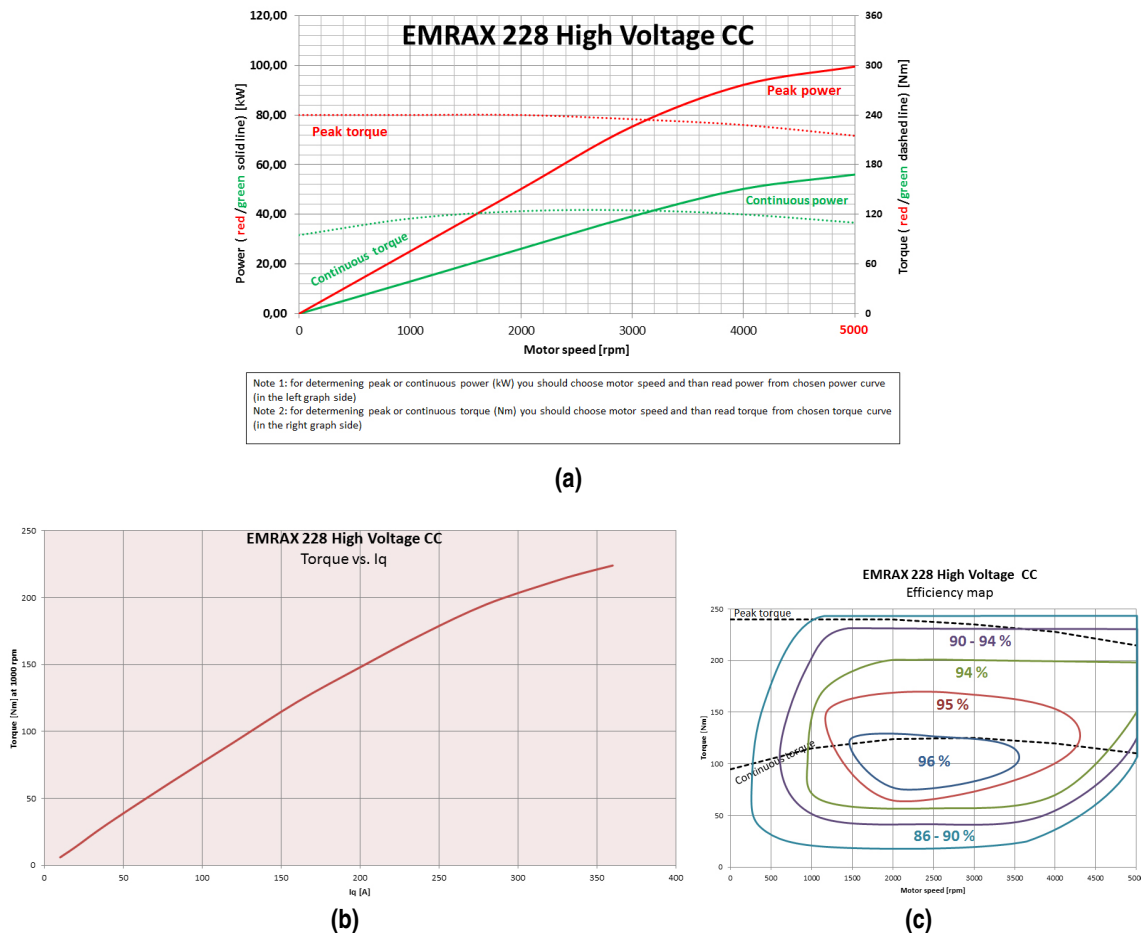


Figura 1.17 Curvas par/potencia vs velocidad que proporciona EMRAX. Fuente: [6].

de este trabajo por no tener sentido, según los modelos de simulación de circuito del Departamento de Dinámica del equipo para un monoplaza típico FSAE.

- **Constantes de tensión-velocidad k_v, k_0 y k_L .** Puede no apreciarse en las ecuaciones desarrolladas anteriormente pero puede llegar a considerarse que una gran influencia sobre la velocidad que puede alcanzarse la tiene la tensión disponible en el lado DC y esto viene a ser representado por las dos constantes k_0 y k_L . La primera describe el nivel de tensión **mínimo** necesario en el bus DC para alcanzar una determinada velocidad *en vacío* que, lógicamente, no será el mismo que cuando el motor se encuentre ya en movimiento y, además, sometido a un cierto par. Es esto último lo que describe la segunda constante k_L , que incluye un caso más pesimista donde, para alcanzar una cierta velocidad se necesite incluso más tensión, es decir, más energía en definitiva. En cualquier caso, con nuestra batería de 453 V alcanzaríamos velocidades en teoría de 4983 y 6342 rpm en vacío y en carga, respectivamente. Como puede comprobarse, el segundo valor supera con creces la velocidad máxima nominal de 5500 rpm recomendada, pero no debemos olvidar que este es el valor *máximo* que un bus DC de 453 V permitiría alcanzar y no necesariamente es el que se logrará cuando se conecte esta fuente de tensión al inversor.

Por otro lado, se conoce de las ecuaciones de comportamiento de la máquina que en una primera aproximación muy básica, se suele considerar que la velocidad es proporcional a la tensión de fase. La interpretación correcta de la constante k_v es que, para una velocidad dada, debemos esperar una tensión de línea proporcional a ella (y lógicamente podemos pasar el dato a magnitud de fase). Obviamente esta linealidad no se dará en la realidad, pero es un parámetro que también se pretende verificar para saber en qué medida el motor se amolda a las ecuaciones tipo.

- **Par entregado y potencia.** Por el momento ya habrá consultado varias veces la figura 1.17-(a) y habrá descubierto que se cumple una de las generalidades de los motores síncronos y es que el par permanece a grandes rasgos constante sea cual sea la velocidad del eje a excepción de las zonas de baja

y alta velocidad. La potencia, por su parte, no es la misma para todos los regímenes de velocidad sino más bien creciente con ella. Como ya hemos mencionado, las simulaciones proporcionadas indican que la zona de interés para la mayoría de las pruebas abarca un rango entre las 2000 y las 4000 rpm como máximo lo que, según la curva de rendimiento Figura 1.17-(c) nos situaría en una eficiencia alta que rondaría el 95/96 %. En esta zona **podríamos extraer desde los 25 a los 52kW** de forma nominal, lo que nos deja un amplio rango de error ante posibles picos para no superar los 80 kW impuestos por la competición. Es precisamente por esto último por lo que interesa caracterizar la potencia entregada por la máquina en dependencia de la configuración del inversor pues muchos equipos llegan a no puntuar en las pruebas dinámicas de la competición por superar la potencia permitida.

- **Constante k_T .** De igual modo que las constantes velocidad-tensión, se quiere comprar la linealidad existente entre la corriente de fase y el par que el motor puede entregar. Normalmente, en la literatura se suele exponer mucho más claro la relación del par con la corriente i_q , pero recordamos que siempre podemos escribir la relación en magnitud de fase por la relación $i_s = \sqrt{i_q^2 + i_d^2}$.

Tabla 1.2 Máquinas síncronas.

	EMRAX 228 MV LC			Infranor BLS-192		
	min	nom	max	min	nom	max
V_{rms}^{in} (V)	0	/	470Vdc*	0	0	400
N (rpm)	0	4000	5500/6500*	0	/	2800
I_{rms}^{in} (A)	0	160	340	0	34.6	¿?
T_{out} (Nm)	0	120	230	0	82	82
P_{out} (kW)	0	28-42	100	0	25	¿¿
k_T (Nm/A $_{rms}^{fase}$)	/	0.75	/	/	2.37	/
k_v (V $_{rms}^{linea}$ /rpm)	/	0.0478	/	/	0.1435	/
k_0 (no load)(rpm/V $_{dc}$)	/	14	/	/	/	/
k_L (load)(rpm/V $_{dc}$)	/	11-14	/	/	/	/

Si lo pensamos bien, acabamos de describir lo que el motor, es decir, la parte pasiva, la carga del sistema, espera recibir para situarse en un régimen de velocidad y potencia. El cómo hacer que la máquina obtenga lo que espera interfiere con el estudio del inversor y su configuración.

El inversor Bamocar D3-700

Una máquina síncrona de las características del EMRAX necesita ser controlada mediante un inversor que, preferiblemente, debería hacer llegar a las bornes del motor unas señales senoidales, como muestra la tabla de características de éste. El inversor *Bamocar*, de la marca alemana *Unitek*, fue escogido por haberse demostrado que trabaja bien al haber sido testado por equipos de Formula Student desde hace ya más de 10 años. Se trata de un convertidor de potencia de cuyo esquema y topología interna se conoce relativamente poco, ya que como es lógico el fabricante es reacio a mostrar detalles de los componentes de potencia que lo conforman y los equipos que deciden abrir la carcasa prefieren no compartir lo que encontraron. Deshacerse de la carcasa de acero en la que se aloja el convertidor por defecto es un paso natural para cualquier equipo, ya que se consigue una disminución notable de peso y espacio, además de averiguar los componentes exactos y la arquitectura que lo conforman, ganando un importante conocimiento de los verdaderos límites de explotación del dispositivo. Las dos únicas razones por lo que en ARUS aún no se ha efectuado es debido a la juventud del equipo eléctrico y a que no supondría ninguna mejora significativa en estos momentos y a la desventaja que supondría no contar con la garantía inicial en caso de tener que enfrentarse a una reparación; sin mencionar los consecuentes problemas de aislamiento eléctrico y emisión de EMI's a los que hay que saber enfrentarse antes de dar el salto.

Dicho esto, si bien es cierto que en este presente trabajo no se va a hacer ninguna suposición más sobre la topología de *Bamocar*, para la construcción del modelo de tren eléctrico sí es interesante hacer una comparativa de las diferentes arquitecturas. Se invita al lector a consultar el trabajo de fin de grado del también miembro del departamento de E-Powertrain, Gonzalo López Díaz [12], donde, desde ya se adelanta,

se concluye que un inversor de tres niveles es adecuado para describir en un primer momento la electrónica de potencia del inversor. Ya que, en la bancada de pruebas vamos a modelarlo como una caja negra, sería conveniente verificar, como en el caso del motor, ciertos parámetros clave. En la tabla 1.3 ya se presentan las principales características donde sólo algunas necesitan de una pequeña aclaración. Ni que decir tiene que la elección de la magnitud en DC o 3FAC es inequívoca si se aprecia que sólo el rectificador Infranor GDPS-400/16 es un convertidor AC/DC.

Tabla 1.3 Convertidores de potencia.

	Bamocar D3-700			Infranor GDPS-400/16			Infranor XtraplusGem		
	min	nom	max	min	nom	max	min	nom	max
$V^{in}(V_{dc} \text{ or } V_{ac}^{rms})$	12	/	700	230	/	480	/	/	800
$V^{out}(V_{dc} \text{ or } V_{ac}^{rms})$	0	/	450	/	570	/	0	380	460
$I_{rms}(\text{A})$	0	200	400	/	/	/	0	35	62
$P_{out}(\text{kW})$	0	140	280	0	16	45	0	25	62
$f_{chop}(\text{kHz})$	8	/	16						

- **La tensión de salida trifásica V_{rms}^{out} .** Puede quedar duda, leyendo la información en la sección de "Technical Data" [1] de si la tensión de salida que se expresa está dada en magnitud de línea o de fase. La interpretación que se le ha dado es que debe corresponderse con una magnitud de línea, ya que haciendo uso de la expresión del modelo de inversor expresada en 1.1, de sustituir la tensión de línea por 450 V, resulta una tensión DC de 735 V, que parece más realista que asumir que es fase ya que entonces resultaría un bus DC de 1272.8 V.
- **La corriente de salida trifásica I_{rms} .** Surge la misma duda que antes, y en este caso el único argumento al que se puede recurrir es a que lo usual en otros fabricantes es que la magnitud de salida en corriente sea de fase, pues es en lo que están descritas la mayoría de hojas de características de máquinas eléctricas rotativas. Por otro lado, en nuestro caso concreto, no afecta pues el motor conectado al inversor tiene sus bobinados dispuestos en estrella, haciendo que corriente de fase y de línea coincidan.
- **La frecuencia de conmutación.** En la hoja sólo se especifican dos frecuencias mínima y máxima, pero también existe una intermedia, pudiendo pues disparar los transistores a 8,12 ó 16 kHz. Además existen otros modos de conmutación que se mencionarán en el siguiente apartado. El uso de cualquiera de las tres frecuencias anteriores provoca un efecto que también será descrito más adelante cuando se describa los parámetros a los que afecta.

El software NDrive y su configuración fundamental

El objetivo de esta temporada de ampliar el conocimiento sobre el inversor tiene como principal misión explorar los parámetros del inversor y qué valores deben tomar para que el motor tenga el comportamiento esperado en cada prueba, en otras palabras, aprender qué configuraciones posibles ofrece Bamocar. Para esto, el fabricante proporciona el software *NDrive V3* cuya interfaz principal se muestra en la figura 1.18 con diferentes secciones configurables y que en la anterior imagen se muestran rellenas según los valores predeterminados que Unitek recomienda para trabajar con el EMRAX 228 y que mencionaremos sólo por encima por no requerir ningún cambio sustancial.

- **Motor y feedback.** La compañía no diseñó el inversor para funcionar únicamente con máquinas de imanes permanentes, sino que permite la opción de conectar motores DC con control de velocidad y máquinas asíncronas con o sin realimentación en posición. Nosotros escogeremos la clase *EC-Servo y Resolver*.
- **Configuración del motor.** Leyendo el manual de Bamocar [1] nos daríamos cuenta de que sólo el valor de la velocidad nominal, N_{nom} es de alguna relevancia, ya que la frecuencia y tensión nominales, además del factor de potencia son parámetros que toman importancia para el control U-f de las máquinas asíncronas (lo que en la interfaz se identifica con "FU"). No podemos dejar pasar, sin embargo, la correcta introducción de los valores de intensidad máxima y nominal en *RMS* que en nuestra máquina serían 340 y 160 A. No obstante, se decide configurar la intensidad máxima admisible por el motor a 300 A **como medida de seguridad extra**, porque a priori no se necesitará esa cantidad de corriente.

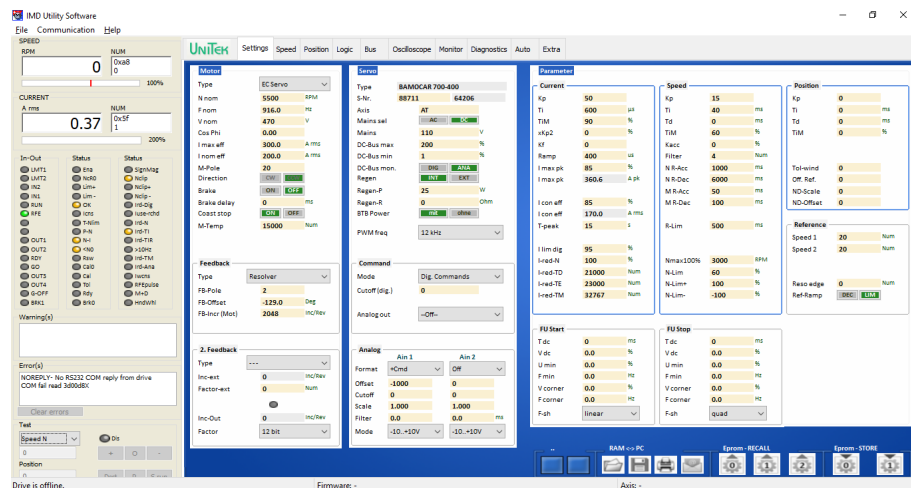


Figura 1.18 Interfaz principal del software de control NDrive.

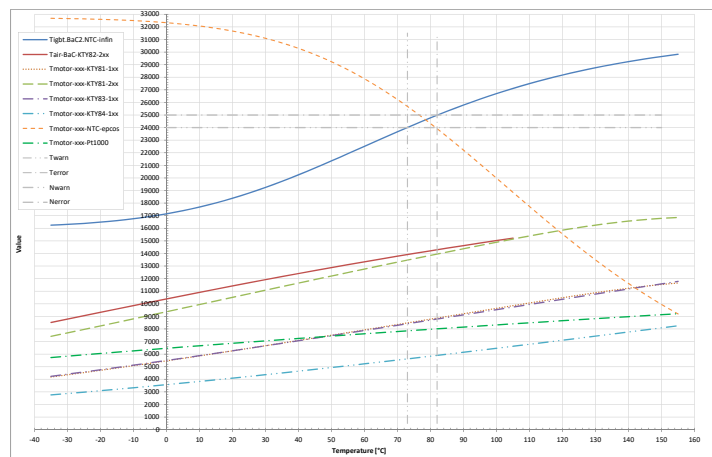
- **Fallo por sobrecalentamiento del motor M-Temp.** Fue un punto de discordia en cierto momento de la temporada debido a que se descubrió que, de serie, el valor estaba mal configurado. Por suerte, Unitek actualizó a principios del 2018 sus manuales e incluyó las curvas de calibración de diferentes sensores de temperatura. Entre ellos se encuentra el sensor *KTY 81-210* que el EMRAX 228 incorpora. Como se observa en Figura 1.19-(a) para no superar la temperatura de error ("Terror"), debemos seleccionar un valor del registro de 14000.

Una vez que se ha definido la máquina con la que trabajará el inversor, se puede pasar a configurar como tal las distintas funciones de seguridad de Bamocar. Para ello hay que prestar atención a ciertos parámetros de la sección *Servo*.

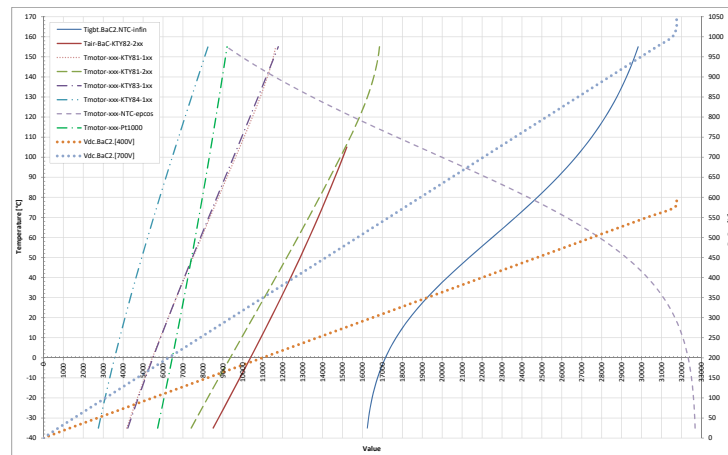
- **Tensión nominal del bus DC.** Es el primer parámetro que permite ser configurado en el apartado, ya que los demás se autoseleccionan automáticamente según el modelo de inversor al que estemos conectados. Necesitaremos tener dos configuraciones para cuando trabajemos en el banco de pruebas con 570 V en el bus DC y otra para cuando pasemos al coche con 450 V. La tensión mínima debe ser correctamente configurada, sobre todo en el caso del monoplaza, donde la salud de las celdas podría verse afectada ante una bajada brusca de la tensión (aunque esto es trabajo del *BMS (Battery Management System)*, una medida extra de seguridad jamás estará de más). La tensión máxima alcanzable por el bus también es un parámetro importante que configurar, esta vez de mayor importancia en la bancada, debido a los problemas de recirculación de potencia comentados al principio de este trabajo. Estableceremos ambos valores al 85 % (484.5 V) y 110 % (627 V) para los trabajos en el banco de pruebas, si bien el límite superior variará en algunos tests como se explicará más adelante.
- **Circuito de frenada o "ballast".** Al igual que ocurría con el rectificador de cabecera, vuelve a surgir la posibilidad de incluir un circuito con una resistencia en paralelo a los terminales DC que sea activado en el evento de una sobretensión para "quemar" la energía sobrante y así reducir la tensión del bus. Existe la opción de tener un circuito externo que sea activado vía la señal de alarma de Bamocar "BTB power", pero también se puede optar por utilizar la resistencia de frenado interna del inversor. Estas dos opciones son las que se controlan mediante el campo *Regen*, donde se seleccionará la opción "int" dado que por el momento no se ha decidido utilizar ningún circuito de frenado externo, y por tanto, los siguientes campos con los valores de la resistencia y la potencia a disipar serán rellenados automáticamente.

Hasta aquí ya hemos configurado la etapa de potencia del inversor y algunas de las protecciones programables que incluye. La siguiente sección *Parameter* permite sintonizar los tres lazos de control clásicos mostrados en la figura 1.20 y que para una máquina de imanes permanentes con feedback en posición mediante resolver son aplicables. Para la aplicación tratada en esta obra el control por posición queda totalmente descartado pues no se necesita de precisión alguna en el giro del rotor. La discusión entre control de par y velocidad sí es factible.

Supongamos que el piloto puede controlar mediante el pedal acelerador la velocidad del motor y que, llegado cierto punto lo relaja al completo. Lo que sucedería en esta situación es que el motor sería comandado



(a)



(b)

Figura 1.19 Curvas de calibración de diferentes termistores para el aviso por sobrecalentamiento en NDrive. Fuente: paquete de manuales descargables de Bamocar-D3.

una velocidad nula, provocando que el vehículo parase en seco. Esta es la explicación simple de por qué es preferible un control en par por parte del piloto. Otras consideraciones desde el punto de vista de la máquina podrían tenerse en cuenta, por ejemplo, podríamos preguntarnos por la corriente necesaria tanto para iniciar el movimiento desde el reposo cuando se fuerza al motor a adquirir un régimen de velocidad no nulo tanto por la intensidad que debería recorrer los bobinados para mantener el rotor con velocidad nula cuando se proviene del movimiento. En ambos casos las consecuencias podrían ser catastróficas para la máquina si no se tiene un buen sistema de seguridad.

Es por esto que vamos a centrarnos en explicar la configuración del lazo de corriente (íntimamente siempre ligado con el par electromagnético generado) ya que es el aplicado al vehículo. Además, como puede comprobarse de la experiencia utilizando el inversor, el control de velocidad deriva en un comportamiento más brusco del motor, lo cuál es lógico, pero es precisamente esta dinámica rápida la que hace variar la tensión del bus DC abruptamente cuando se cambia de régimen de velocidad, pudiendo llegar a una desconexión por sobretensión cuando se pretende parar la máquina comandando velocidad cero. El bucle de par, por su parte, acelera y desacelera el motor de una manera más suave, procurando un comportamiento más seguro del bus

de continua.

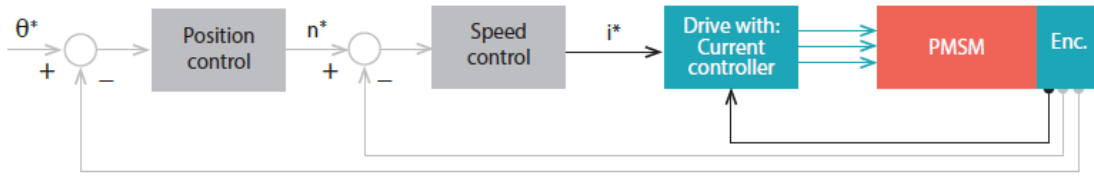


Figura 1.20 Lazos de control disponibles para un PMSM. Fuente: [5].

El control de corriente y Bamocar

Antes de adentrarnos en la configuración de los parámetros, es necesario tener una visión global de los mecanismos básicos de control de la máquina eléctrica. Vamos a describir paso a paso el algoritmo de control representado en el esquema 1.21-(a).

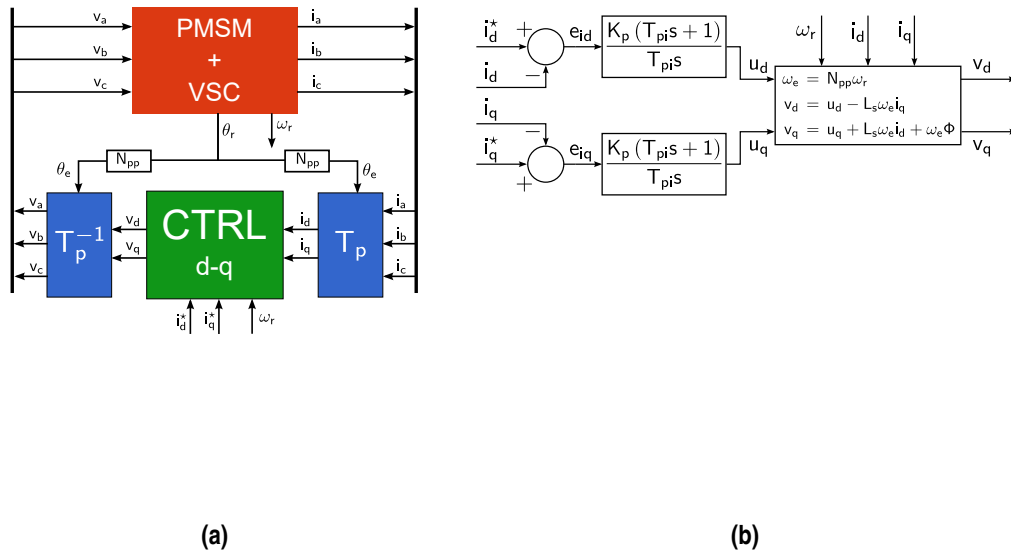


Figura 1.21 Esquemas del control de corriente en ejes dq y abc. Fuente: [7].

- Comenzamos por la lectura de las intensidades de fase que recorren los devanados del PMSM para poder procesarlas y aplicarles las transformadas de Park y Clarke, para obtener las magnitudes de control en ejes d-q.
- El anterior puede parecer un paso insignificante, pero gracias a que poseemos las corrientes en ejes d-q, el problema de control ahora puede describirse como un clásico problema de seguimiento (o *tracking*), al ser las magnitudes a controlar constantes en el tiempo. Es ahora cuando podemos entrar en el bloque de control, descrito en más detalle en la figura 1.21-(b). Es en el microcontrolador donde se compararán las intensidades i_d e i_q actuales con las comandadas en ese momento y se le aplicará un control proporcional-integral a ese error, de donde resultan, trámite a la aplicación de las ecuaciones del cambio de variables del modelo matemático del motor, las tensiones v_d e v_q .

- No quedaría más que aplicar las transformadas inversas, un mero aparato matemático, para obtener las tensiones de fase que habrían de aplicarse al motor que consigan generar el flujo que satisfaga la consigna de par deseada. Algo que puede resultar curioso si no se conoce bien la teoría detrás de las transformadas es la lectura de la velocidad del eje. Esto es necesario para la transformada de Park, la cual necesita de la velocidad de rotación para, mediante técnicas de integración, obtener la posición del eje y efectuar el llamado lazo de seguimiento de fase o *Phase Locked Loop (PLL)*.

Lo único que se ha dejado, quizá, al aire es la obtención de los valores de las corrientes en ejes d-q necesarios para satisfacer el objetivo de control en par. Esto pertenece al ámbito del modelo matemático desarrolla en el ya citado trabajo [12] y del cual sólo se mostrará aquí las relaciones finales. Se pueden discutir las diferencias entre máquinas de imanes superficiales e interiores y cuál es de más correcta utilización en el modelo de simulación, pero de la ecuación 1.2 para un motor de imanes superficiales se vislumbra que dadas unas corrientes en ejes dq y un estado de excitación del flujo magnético, puede obtenerse un par electromagnético.

$$\tau = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \cdot (i_q \cdot \phi_{md} - i_d \cdot \phi_{mq}) \quad (1.2)$$

Siendo ϕ_{mq} e ϕ_{md} el flujo mutuo estátor-rotor expresado en ejes dq.

Ahora que ya tenemos conocimiento qué magnitudes afectan en la obtención de un par consigna pasamos a tratar la configuración de la sección *Current* del inversor. De nuevo, se va a tratar punto a punto los parámetros de destacado interés.

- **Controlador PI.** En realidad los dos controladores que se aprecian en la figura 1.21-(b) tienen exactamente la misma sintonización, por lo que lo introducido en los campo K_p y T_i irán destinados éstos. Los valores que tomarán en un primer momento estas variables vienen dadas por las relaciones 1.3 que derivan directamente de la teoría de control motor.

$$K_p = L_s \cdot 10^3 / 2 = 0.775 \quad (1.3a)$$

$$T_i = R_s / L_s = 51.29 \quad (1.3b)$$

Los siguiente tres campos están relacionados con la gestión de memoria del microcontrolador y no son esenciales para el bucle de corriente.

- **Rampa en intensidad.** Es la primera vez que nos topamos con el concepto de rampa, por lo que es merecida otra pequeña pausa para explicar cómo esto afecta seguimiento de una consigna y para ello nos basaremos en la figura 1.22. Las rampas establecen un control PI adicional sobre el ya estudiado anteriormente, es decir, una vez que una consigna ha sido determinada, se controla la tasa de variación de la magnitud consignada resultando en un retraso lineal como el observado en la figura. El parámetro se mide en μs y como se observa una menor actuación de la rampa, esto es, la consigna será alcanzada en un menor tiempo cuando, por el contrario, un mayor tiempo de rampa provocará que el alcance del valor consigna se dilate más en el tiempo. En el caso de la configuración de las rampas de aceleración, interesa que la rampa de ascensión sea rápida para que el piloto note el menor retraso posible en su acción, pero por el contrario, los que conducen el monoplaza se sienten más cómodos si tienen la sensación de que el vehículo no decelera bruscamente o en otras palabras, les gusta sentir que el coche "retiene". Este es el efecto de reducir la marcha en los vehículos de combustión interna habituales y es un factor que se tiene en cuenta en el pilotaje de vehículos de competición.

Para lo que nos atañe, la rampa de intensidad se mantendrá en el valor por defecto de $400\mu s$.

- **Intensidades permisibles.** Este apartado requiere una especial atención, pues los valores pueden ser cambiados de manera habitual por el ingeniero/a al cargo de la prueba. Se basan en una configuración no accesible por el usuario y que está relacionada con los límites del inversor. Como se puede ver en la tabla resumen 1.3 y comprobar en el capítulo 6 del manual del usuario de Bamocar [1], la intensidad máxima nominal son 200 Arms, que a su vez también puede especificarse como 282 Apk. Del mismo modo, la intensidad puntual máxima admisible viene expresada en valores pico y es 424 Apk. En el mencionado manual también vienen indicados el equivalente en Num. El valor máximo al que se puede llegar es como mucho el 85 % de los valores máximos e interpretamos que es una medida de Unitek para asegurarse un cierto margen de seguridad. El valor máximo que la intensidad podrá adoptar de manera continuada viene determinado por I_{coneff} , el cual es un porcentaje directo del mencionado

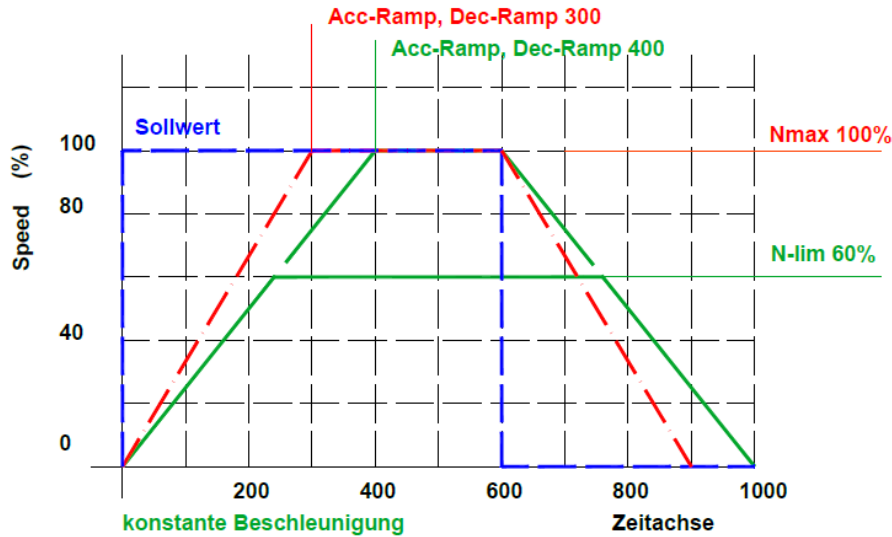


Figura 1.22 Efecto de la configuración de la rampa en la velocidad del eje. Fuente: [1].

límite del inversor y por su parte, I_{maxpk} será la encargada de establecer la limitación de los valores pico. Por último, el tiempo T-peak es aquel que permitiremos al inversor permanecer en un régimen de corriente igual a la máxima, que por el momento permanecerá en 15 segundos.

- **Reducciones de corriente.** Adicionalmente se tiene la posibilidad de, en el evento de una situación que pueda empezar a comprometer la seguridad del inversor, limitar la corriente de salida. Esta reducción puede darse por sobrepasar una velocidad determinada ($I_{red} - N$), por superar un umbral en la temperatura de los IGBTs ($I_{red} - TD$) y, llegado cierto punto, proceder a una desconexión ($I_{red} - TE$). Estos dos últimos parámetros son interesantes configurarlos si queremos establecer un margen de seguridad con la temperatura máxima a la que se produce una parada por defecto, los 83°C. Por último también se puede elegir empezar a reducir la intensidad circulante debido una temperatura excesiva del motor ($I_{red} - M$)

Podríamos dar por concluida la configuración del inversor, pues los dos bucles de control en velocidad y en posición no resultan interesantes para la aplicación tratada. Cuando el tren eléctrico de potencia esté instalado en el monoplaza, no se pretende que la velocidad esté capada por ningún motivo, sin embargo, imponer un límite superior en velocidad resulta muy ventajoso. En efecto, durante el tiempo de operación del conjunto en la bancada de pruebas siempre se encontraría fijado un límite de velocidad menor al 100% de la máxima. Según el manual de usuario, cuando se configura un límite, por pequeño que sea, el bucle de control en velocidad entra en juego y con ello, la dinámica de su controlador PI. Este aspecto será discutido en mayor profundidad en los siguientes capítulos, pero de momento sólo es necesario mantener que los campos N_{max} se mantendrán a 5000 rpm (margen adicional de seguridad con respecto a las 5500 rpm reales a las que se puede someter al motor) y la velocidad máxima alcanzable se define según el porcentaje $N - Lim$. Los parámetros $N - Lim+$ u $N - Lim-$ tienen relación con la frenada regenerativa y no se les presta atención. Un último punto interesante sobre el que mostrar interés se trata de las rampas de aceleración $M - R - Acc$ y $M - R - Dec$, que actuarán igual que la anterior rampa en intensidad mencionada, pero esta vez el control se centra en la tasa de aceleración o desaceleración. El valor se establece por defecto como el mostrado en la figura 1.18, pero resultará ser uno de los parámetros más interesantes a sintonizar como descubriremos inmediatamente.

2 Pruebas en vacío

Vamos a describir el transcurso de todas las pruebas efectuadas a lo largo de la temporada sin el motor freno conectado, es decir, en vacío. Bajo estas condiciones, idealmente la máquina no demandaría intensidad alguna pues no habría de generar ningún par electromagnético. En la realidad, siempre es necesaria cierta circulación de intensidad por los bobinados, la llamada corriente de control, derivada de la generación del flujo magnético, necesaria para el giro de la máquina y de las no idealidades del circuito eléctrico como fugas magnéticas, capacidades parásitas, etc. Se descubrirán, sin embargo, ciertos efectos no esperados y propios de la experimentación en la vida real en un ambiente con distorsiones electromagnéticas.

2.1 Procedimientos y análisis previos

Con estas pruebas se pretendía verificar la característica tensión-velocidad de la máquina como parámetro principal, pero también consistía en un primer contacto con el funcionamiento del sistema y control del inversor. Las personas encargadas del proceso necesitan ser entrenadas en la adquisición de datos, manejo manual de Bamocar ya que un mínimo fallo o imprudencia puede conllevar graves repercusiones para los dispositivos. En ese sentido, la norma indica que un mínimo de dos personas son necesarias para trabajar bajo tensión, pero se aprovechó el hecho de que el equipo de bancada estuviese formado por tres personas para disponerlas de la siguiente forma:

- Una persona será la encargada de controlar el EMRAX-228, comandando la consigna necesaria a Bamocar y cambiando los parámetros que se encuentren más oportunos en cada prueba. Esta primera persona es encargada de comunicar a los demás las medidas del inversor, como la velocidad de rotación y otros valores de los registros del inversor.
- Una segunda persona se dispondrá cerca del osciloscopio, con el objetivo de ajustarlo de forma que se obtenga una buena captura de las formas de onda. Además, también será responsable de las lecturas de los polímetros y la comunicación a los demás.
- Una última persona estará al cargo de anotar todo lo que sus compañeros/as comuniquen en una hoja de cálculo para su posterior estudio. Adicionalmente, será el encargado/a de pulsar la seta de emergencia en el evento de alguna anomalía o a la señal de los demás.

No obstante, el trabajo en equipo es también una cualidad que puede ser entrenada, sólo consiguiéndose una buena coordinación tras muchas horas de trabajo y previa la definición de un protocolo de actuación claro. Lo anteriormente expuesto no fue necesariamente lo que ocurrió en las primeras pruebas en vacío, utilizando por ejemplo, anotaciones en papel en vez de en una hoja de cálculo.

2.1.1 La preparación previa. El autophasing

Una vez el sistema ha sido puesto en marcha según el protocolo expuesto en [2] y visible en la figura 2.1 la tensión del bus DC debería estar alimentando al inversor. El primer paso que deberíamos efectuar sería un *autophasing*. El proceso consiste en una rutina de medida automática para determinar la posición angular precisa del flujo en el motor ya que el bucle de control necesita de la máxima precisión para un control de par correcto. Para comenzar el proceso, nos dirigiremos a la pestaña "Auto" de Bamocar y seleccionaremos la función especial número 4, llamada "Phasing rotating" como muestra la figura 2.2. Como se describe

en la sección 21.5 del manual de NDrive [19], previamente han debido modificarse la corriente nominal al 30 % de su valor habitual, además escoger un límite en velocidad del 5 %. Al margen de esto, nosotros hemos escogido limitar también la corriente máxima de pico al 40 % por recomendación de otros equipos de Formula Student en la web.

Estos cambios en la configuración para el proceso de autphasing son necesarias como medida de seguridad dado que durante la operación de sincronización se demanda una gran intensidad. Gracias a que ARUS dispone de un ambiente controlado y monitorizado en una bancada de pruebas, se pudo medir la onda de intensidad durante el proceso, identificando la gran magnitud pico-pico de la misma y tomando consciencia de los problemas que podría acarrear una incorrecta configuración. No siendo en otros equipos de la competición, de conversaciones derivadas en la misma nos admitieron que muchos tuvieron serios daños al efectuar esta rutina como consecuencia del desconocimiento de la demanda de energía en el proceso.

Para llevar a cabo la lectura de la posición del rotor se describe de la siguiente forma:

- Se hace clic sobre el botón "Start" de la figura 2.2.
- Antes de que transcurran 10 segundos otra persona debe de activar el selector en la puerta del cuadro nombre "Enable". Esto hará que las señales "Rotating field enable" y "Ready to run" del inversor pasen a estado alto, lo que da paso a la rotación del motor.
- Acto seguido, la máquina efectuará un lento giro de 360° donde el resolver recalibrará su posición de forma automática.
- Tras el proceso, la ventana "Feedback" de la pestaña "Settings" habrá actualizado sus valores. Es muy importante guardar estos valores en la memoria EPROM del inversor, para lo que pulsaremos sobre el icono con un 0 de la esquina inferior derecha.

En teoría, tras el último paso los valores calibrados del resolver quedan almacenados para siempre en la memoria no-volátil del inversor, pero sí es cierto que es una buena práctica efectuar un proceso de autphasing cada vez que se disponga a hacer un test. Esto tiene su fundamento en que es fácil que alguien haya movido el rotor de la máquina cuando ésta estaba desconectada, haciendo que la posición se desincronice con respecto a la medida anterior.

Con esto listo, ya se podría empezar a controlar a Bamocar, donde lo último que quedaría sería pulsar el botón "Dis" en la esquina inferior izquierda hasta que no estuviera iluminado, lo que dejaría el enable de "FRG" (Ready to Run) activado. En un primer momento se prueba a dar una consigna de velocidad, algo que ya se ha discutido que no será lo que ocurrirá en el vehículo, pero dado que se pretendía alcanzar un régimen de velocidad relativamente preciso, se decidió empezar seleccionando en el desplegable de consigna manual la opción "Speed N". La manera de proceder ha de ser suave, consignando valores de manera gradual para que el pico de tensión no supere el máximo configurado y produzca la desconexión del inversor.

En cuanto a esto, es fundamental conocer las unidades en las que son introducidas las consignas. Bamocar identifica los valores introducidos en los registros como *Num* que no son más que los valores en base decimal de los números binarios que realmente se encuentran guardados en los registros. Para más complicación, hay que tener en cuenta que no necesariamente por aumentar la consigna en 1 *Num* se aumenta la velocidad, si no que los registros donde estamos escribiendo tienen una precisión menor a la que alguien podría pensar en un primer momento, teniendo por tanto que aumentar en varias decenas de *Num*'s hasta que el régimen de velocidad cambia. La correspondencia entre estas y las unidades físicas en *rpm* que la máquina alcanzaba no aparecen de manera explícita en el manual del inversor, por lo que se efectuaron primeramente unas pruebas iniciales para comprobar la relación, presentada en la tabla 2.1. Se acaba determinando que la relación resulta ser, como era de esperar, una constante $r_{rpm2Num} \approx 6.6$. Ahora, cuando se pretenda alcanzar un régimen de velocidad concreto, la consigna en *Num* que habría de introducir ya es fácilmente conocida.

Tabla 2.1 Pruebas realizadas para caracterizar la relación rpm-Num.

N(rpm))	1000	1500	2000	2500	3000
N(Num)	6600	9900	13200	16500	19800

Ya nos encontramos por fin en disposición de presentar la tabla 2.2. Aquí han sido transcrita la información recogida por inspección visual de los aparatos de medida y del software NDrive en el momento de los ensayos,

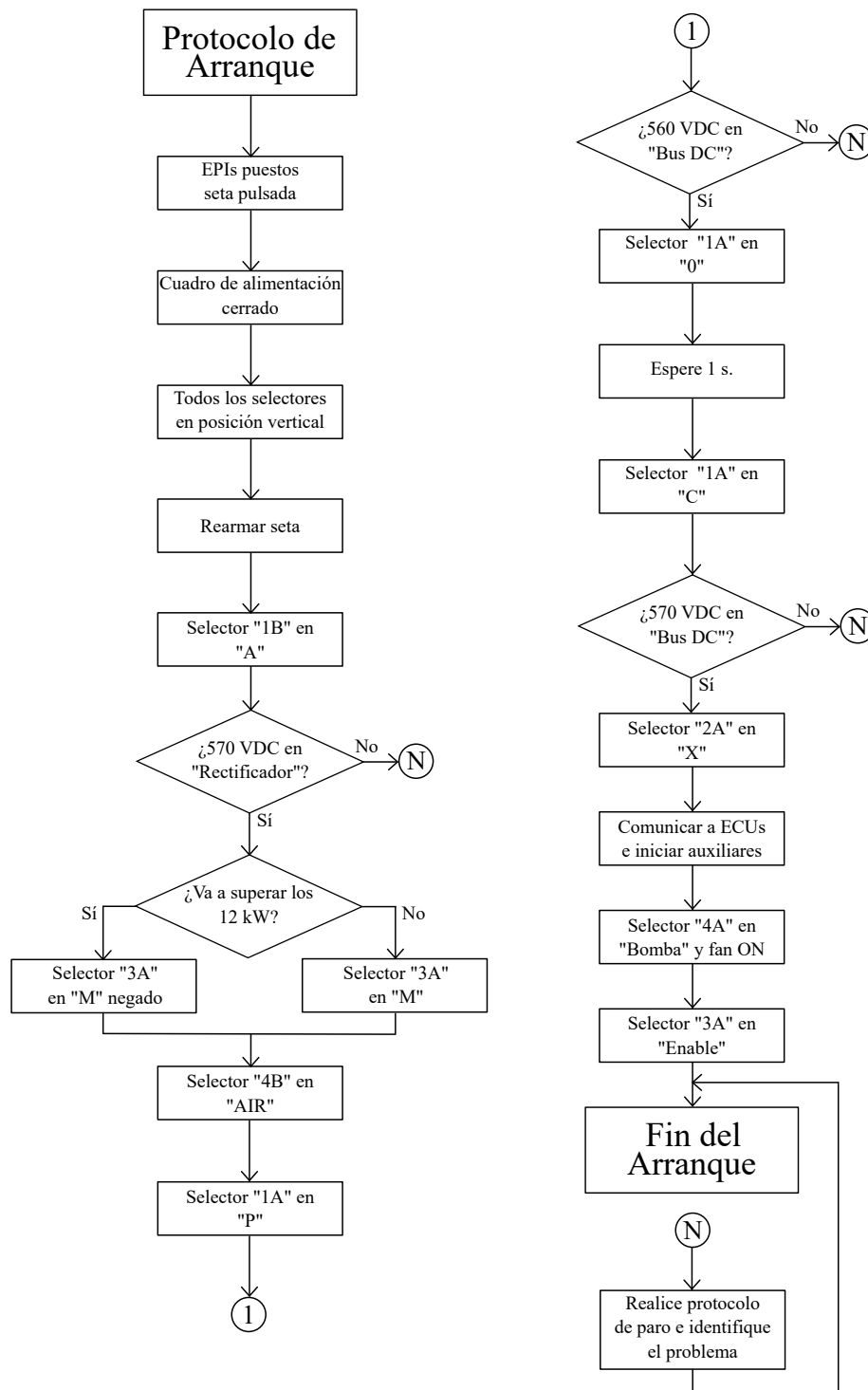


Figura 2.1 Localización de la función especial que comienza el proceso de autophasing. Fuente: captura propia del software NDrive.

siendo el resultado de incrementar paulatinamente la velocidad de rotación. Es evidente que esta no es la forma ni más eficiente ni más exacta de recoger los valores de las magnitudes eléctricas, y es por eso que a lo



Figura 2.2 Localización de la función especial que comienza el proceso de autophasing. Fuente: captura propia del software NDrive.

largo del resto del trabajo el lector será guiado a través del avance y la mejora de la técnica de adquisición. Aún así, hay muchos aspectos que pueden ser analizados con esta información.

Tabla 2.2 Datos registrados a mano en el primer ensayo en vacío.

N (rpm)	Idc (Idc)	I fase pinza (Arms)	I fase osci (Arms)*	V línea osci (Vrms)*	Vdc (Vdc)
500	0.6	1.5	2	22.4	0
1000	1.4	2.2	7	43	0
1500	2.1	3.2	9	59	0
2000	3.0	5.1	12	74	0
2520	3.7	7.4	14	85	0
3000	4.2	9.3	36.5	91	0
3500	4.9	11.8	50	96	510
4000	5.6	13.7	36	99	508
1530	6.1	16.1	37	100	503

Análisis en Matlab

Inspeccionando la tabla anterior puede dar podría pensarse que las fluctuaciones son más que notables en algunas magnitudes y, con razón, se puede dudar de la veracidad de los datos. Al error cometido tomando las medidas a mano habría que sumar la incertidumbre de los aparatos de medida. Es por eso que, aprovechando que al menos se han monitorizado la corriente de fase y la tensión de línea, se va a realizar un análisis en MATLAB® para comprobar, en primera instancia, que la velocidad anotada es la correcta, mediante la lectura de la frecuencia eléctrica de la tensión de línea. Como puede observarse en el código 2.1, los ficheros en formato .csv provenientes del osciloscopio siguen una secuencia que involucra la fecha y hora del ensayo, a parte asignársele a cada ensayo un identificador de modo que el tratamiento de los datos se hace mucho más sencillo. Es código presenta un método para calcular el valor rms de las ondas corriendo varias veces el modelo en Simulink según un bucle.

Código 2.1 Exportación a Simulink y tratamiento de los datos del ensayo en vacío.

```

%% Importado de datos
% Fecha y hora del ensayo
fecha = ['20190610']; % En el formato AñoMesDía
hora = {'181205','182142','183409','184138','184823','185247','185735','190157',
    ...,
    '190513','192923'}; % En el formato HoraMinSeg
ext = ['.CSV']; % Extension en la que hayamos guardado
    los datos
Num_Ensayo = {'M87','M437','M874','M1311','M1748','M2185','M2622','M3059',...
    'M3496','M4370'}; % Número de ensayos que realizamos

for N=1:length(Num_Ensayo)
path = strcat('Vacio 10 Junio 2019/Originales/',fecha,'_',hora{N},ext);
Datos = Importa_Datos_Oscilo(path,16,10025);
%%
SampleRate = 200000.00000; % En [muestras/s]
Ns = length(Datos.VarName2); % Número de muestras
Ts = Ns/SampleRate; % Tiempo de muestreo
Fs = 1/Ts;

t = [0:Ts/Ns:Ts-Ts/Ns]'; % Necesitamos un vector de tiempos
    para importar las variables a Simulink
r_transd = 230/1.88; % Relación de transformación del
    transductor

Ten_A = Datos.VarName2*r_transd;
Ten_B = Datos.VarName3*r_transd;
Ten_C = Datos.VarName4*r_transd;
V_fase = [Ten_A,Ten_B,Ten_C];
Curr_A = Datos.VarName5;
Curr_B = Datos.VarName6;
Curr_C = Datos.VarName7;
I_fase = [Curr_A,Curr_B,Curr_C];

Ua = [t,Ten_A]; % Tensión fase A
Ub = [t,Ten_B]; % Tensión fase B
Uc = [t,Ten_C]; % Tensión fase C
Ia = [t,Curr_A]; % Intensidad fase A
Ib = [t,Curr_B]; % Intensidad fase B
Idc = [t,Curr_C]; % Intensidad bus DC

% Corremos el modelo para halla las tensiones de línea en variables
sim('FFT_vacio',Ts)
Tensiones_linea = [Graf_Ten_linea{1}.Values.Data(:,1), ...
    Graf_Ten_linea{2}.Values.Data(:,1), ...
    Graf_Ten_linea{3}.Values.Data(:,1)];

Tensiones_linea_filtradas = [Graf_Ten_linea_filtr{1}.Values.Data(:,1), ...
    Graf_Ten_linea_filtr{2}.Values.Data(:,1), ...
    Graf_Ten_linea_filtr{3}.Values.Data(:,1)];

Tensiones_fase = [Graf_Ten_fase{1}.Values.Data, ...
    Graf_Ten_fase{2}.Values.Data, ...
    Graf_Ten_fase{3}.Values.Data];

Tensiones_fase_filtradas = [Graf_Ten_fase_filtr{1}.Values.Data, ...

```

```

Graf_Ten_fase_filtr{2}.Values.Data, ...
Graf_Ten_fase_filtr{3}.Values.Data];

Intensidades = [Graf_Int{1}.Values.Data, ...
Graf_Int{2}.Values.Data, ...
Graf_Int{3}.Values.Data];
Intensidades_filtradas = [Graf_Int_filtr{1}.Values.Data, ...
Graf_Int_filtr{2}.Values.Data, ...
Graf_Int_filtr{3}.Values.Data];

for j=1:3

rms_Tensiones_fase(N,j) = rms(Tensiones_fase(:,j));
rms_Tensiones_fase_filtradas(N,j) = rms(Tensiones_fase_filtradas(:,j));
rms_Tensiones_linea(N,j) = rms(Tensiones_linea(:,j));
rms_Tensiones_linea_filtradas(N,j) = rms(Tensiones_linea_filtradas(:,j));
rms_Intensidades(N,j) = rms(Intensidades(:,j));
rms_Intensidades_filtradas(N,j) = rms(Intensidades_filtradas(:,j));

end

```

El único parámetro a modificar del anterior código es el número de ensayo que se desea analizar con la variable N. Una vez hemos extraído los datos de los ficheros y están disponibles en el workspace podemos exportarlos a SIMULINK® gracias al pequeño modelo mostrado en la imagen 2.3, donde lo único que se efectúa es el guardado de las variables como dataset de forma que sea reconocible por la herramienta FFT analysis. Ya en la figura anterior se muestra cómo acceder a la mencionada herramienta, que facilitará mucho el tratamiento de las ondas ya que la interfaz gráfica incluye muchas funciones por defecto que, de no estar ya creadas, habría que programarlas manualmente.

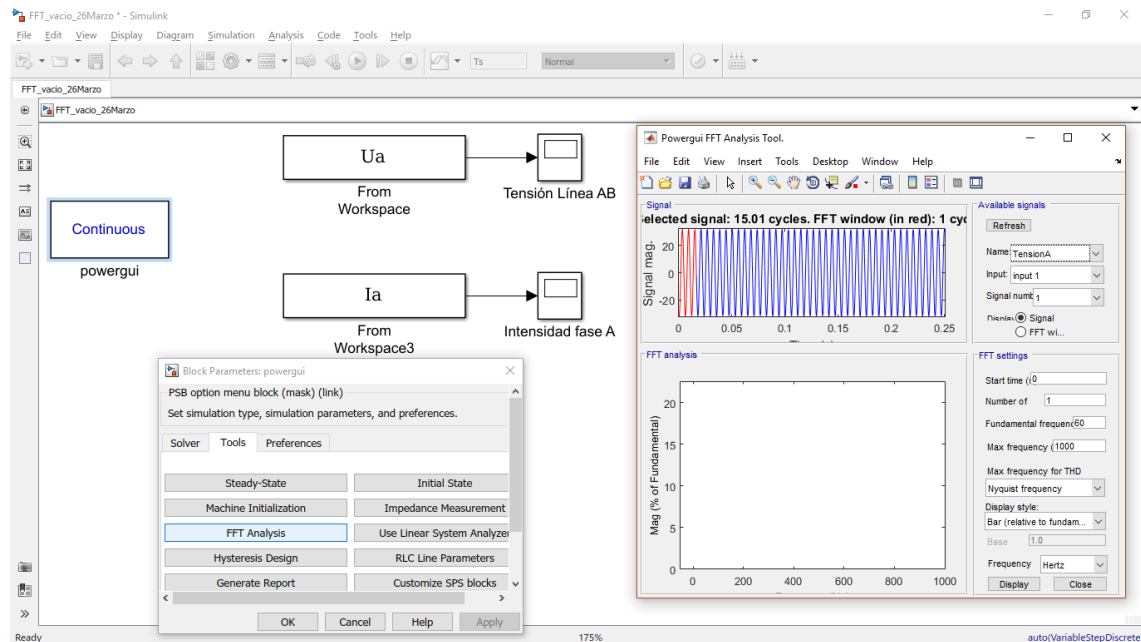


Figura 2.3 Localización de la función especial que comienza el proceso de autophasing. Fuente: captura propia del software NDrive.

En esta herramienta se presenta la onda completa disponible para analizar en color azul y, en rojo, la que se tiene en cuenta para la realización de la FFT, y por ello puede seleccionarse los ciclos que se quieren tener en cuenta (que se recomienda aumentar en caso de que la densidad de muestras sea baja), el instante de comienzo y la frecuencia de la onda. Es precisamente así como podemos comprobar que la velocidad anotada

durante los ensayos es correcta dado que si al introducir la frecuencia eléctrica equivalente a la velocidad de rotación, deberíamos comprobar que en rojo aparece un ciclo entero de la onda de tensión. Esta íntima relación entre frecuencia de giro y eléctrica debe darse siempre, al menos en el armónico fundamental. Así pues, y teniendo en cuenta el número de pares de polos y los cambios de magnitudes oportunos, se obtiene la relación 2.1 que se usará a menudo en el resto de operaciones y en concreto es la que se usa para la reconstrucción de las frecuencias eléctricas.

$$f_{elec} = N_{rot} \cdot 1/6(Hz) \quad (2.1a)$$

Tras haber comprobado todos los ensayos, se determina que las ondas de tensión demuestran un cierto error, en algunos casos muy acusado en la velocidad medida en la prueba en cuestión. Esta diferencia puede ser fácilmente achacada al rizo en velocidad inherente en los ensayos y si tenemos en cuenta que cuando se tomó la medida el responsable tuvo que escoger un valor aproximado, es normal entender la variación en las medidas.

Al mismo tiempo, en las últimas líneas del código 2.1 puede comprobarse que se ha calculado el valor RMS de la ondas de tensión para comprobar la afinidad de las medidas tomadas con los polímetros y el osciloscopio. Resultado de comparar la velocidad y al tensión para los diferentes ensayos se muestra la figura 2.4 donde se ha cuantificado el error relativo en las dos magnitudes. Como se puede comprobar, el error en tensión está en la mayoría de las veces, contenido por debajo del 10%, excepto en el segundo y cuarto ensayo donde la gran discrepancia también en velocidad debe estar detrás del error en tensión. La incoherencia en las medidas puede inducir a pensar que ninguna de las tomadas en un ensayo son correctas, sin embargo, lo que va a adoptarse aquí es la idea de que la mayor fuente de error es la medida de velocidad y que por tanto, las demás medidas son correctas, sólo que proceden de un punto diferente en el mapa de velocidades. Con esto, sólo quedaría reordenar los datos para las velocidades correctas y representarlas en una gráfica.

Datos analizados en Matlab				
frec fund elec (Hz)	N (rpm)	E rto velocidad (%)	V línea Matlab (Vrms)	E rto tensión (%)
82	492	1,6	22,5373	0,6092123
240	1440	-44	59,1648	27,321651
265	1590	-6	62,9727	6,3086067
410	2460	-23	85,7344	13,686921
470	2820	-11,9047619	91,8611	7,4689939
320	1920	36	73,3364	-24,08572
550	3300	5,714285714	96,8511	0,8787716
620	3720	7	99,986	0,9861381
690	4140	8,609271523	101,0866	1,0749199

(a)

Datos tomados a mano en bancada reordenados						Datos analizados en Matlab				
	N (rpm)	Idc (Adc)	I fase pinza (Arms)	I fase osci (Arms)	V línea osci (Vrms)		N (rpm)	E rto velocidad (%)	V línea Matlab (Vrms)	E rto tensión (%)
V1	500	0,6	1,5	2	22,4	V1 Matlab	492	-1,62601626	22,5373	0,60921228
V2	1000	1,4	2,2	7	43	V2 Matlab	1440	30,55555556	59,1648	27,3216507
V3	1500	2,1	3,2	9	59	V3 Matlab	1590	-4,166666667	62,9727	0,278544
V4	2000	3	5,1	12	74	V4 Matlab	1920	5,660377358	73,3364	6,30860675
V5	2520	3,7	7,4	14	85	V4 Matlab	2460	-4,166666667	85,7344	-0,9048713
V6	3000	4,2	9,3	36,5	91	V5 Matlab	2820	-2,43902439	91,8611	0,85659898
V7	3500	4,9	11,8	50	96	V7 Matlab	3300	-6,382978723	96,8511	0,93739352
V8	4000	5,6	13,7	36	99	V8 Matlab	3720	9,090909091	99,9861	6,04133562
V9	4530	6,1	16,1	37	100	V9 Matlab	4140	-6,060606061	101,0866	0,87877164

(b)

Figura 2.4 Comparación de los puntos del ensayo y reordenamiento en base al menor error relativo en velocidad.

En la tabla 2.4-(b), se han resaltado las correspondencias finales, donde puede comprobarse que existe un ensayo, el V2 con 1000 rpm anotadas, que se aleja demasiado de la velocidad y la tensión que revela el estudio posterior y por ello, descartaremos por tanto estos datos. Esta práctica será habitual en los ensayos por venir.

2.2 Resultados de las pruebas

2.2.1 Primer ensayo. 26 de marzo

Tras el reordenamiento de estos primeros ensayos hemos tenido oportunidad de procesar los valores RMS de todas la onda de tensión de línea en MATLAB®. Recordamos que la intención es comparar su evolución y observar la pendiente producida para poder compararla con el comportamiento líneas descrito en la hoja de características del motor EMRAX, de $0.0478 V_{rms}/rpm$. En la tabla 2.3 ya aparecen los datos del ensayo, reordenados y listos para su visualización en el gráfico 2.5. Como se puede comprobar, tras un primer análisis, la pendiente de la línea de tendencia no se ajusta al comportamiento teórico del motor.

Tabla 2.3 Datos registrados a mano en el primer ensayo en vacío.

N (rpm)	V línea AB (Vrms)	V línea teórica
492	22,5373	23,5176
1440	59,1648	68,832
1920	73,3364	91,776
2460	85,7344	117,588
2820	91,8611	134,796
3300	96,8511	157,74
3720	99,986	177,816
4140	101,0866	197,892

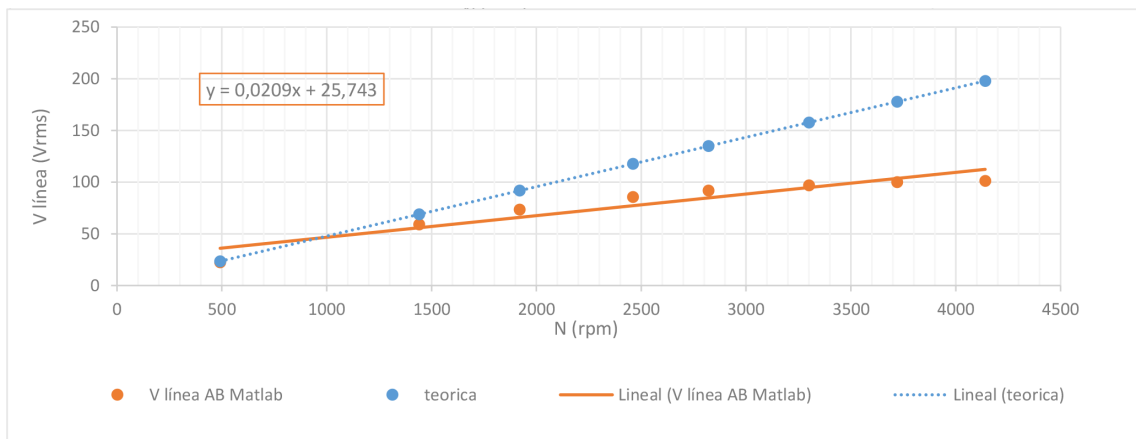


Figura 2.5 Gráfico tensiones de línea vs velocidades de rotación. Ensayo del 26 de Marzo. Fuente: Propia.

Para este primer ensayo, muchos de los resultados fueron tomados a mano de los aparatos de medida y, por primera vez, se analizaron y guardaron los valores con un osciloscopio digital. Los puntos que estamos analizando son el resultado de medir la tensión entre dos bornes del motor y con una configuración en el aparato de medida no anotada, por lo que se podría, por ejemplo, estar filtrando sin ser conscientes la señal de tensión. Esto explicaría que los tan pequeños valores que toma la tensión en comparación con la curva teórica. Otro punto que pudiera haber causado fallos es la no utilización de un transductor para la medida de la tensión que resulta más que conveniente en estas situaciones. Ni que decir tiene, que aunque sería beneficioso para los resultados, en ningún momento se puso en peligro la integridad del osciloscopio, ya que el módulo encargado de la medida de tensión soporta hasta 1500 Vrms como se especifica en la página 14 del capítulo 19 del manual del usuario del aparato [21]. Se hace evidente una mejora en la toma de medidas.

Tanto estas mejoras, como el análisis de los datos del bus DC se discutirán en los capítulos por venir, pues es con la toma de más valores cuando se puede caracterizar bien las magnitudes de continua.

Gracias al software creado 2.2, pueden guardarse automáticamente las gráficas de las señales guardadas con el osciloscopio y por cuestiones de estética del documento, se muestran todas juntas en el apéndice Apéndice A.

Código 2.2 Generación y guardado automático de gráficas para los ensayos de vacío.

```

%% Para cada ensayo, vamos a guardar ciertas gráficas

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Número de ensayo que da nombre al título de las gráficas. Cambiar a
% placer para cada gráfica:
texto_ensayo = '(N = 4000 rpm)';

% Tensiones de fase
TriplePlot(Graf_Ten_fase{1}.Values.Time, ...
Graf_Ten_fase{1}.Values.Data, ...
Graf_Ten_fase{2}.Values.Data, ...
Graf_Ten_fase{3}.Values.Data, ...
strcat('Tensiones de fase',texto_ensayo),...
'V fase A (Vrms)', ...
'V fase B (Vrms)', ...
'V fase C (Vrms)', ...
'Tensiones de fase\');

% Tensiones de fase solo A y C
DoublePlot(Graf_Va_Vc{1}.Values.Time, ...
Graf_Va_Vc{1}.Values.Data, ...
Graf_Va_Vc{2}.Values.Data, ...
strcat('Tensiones de fase A y C',texto_ensayo),...
'V fase A (Vrms)', ...
'V fase C (Vrms)', ...
'Tensiones fase A y C\');

% Tensiones de fase filtradas
TriplePlot(Graf_Ten_fase_filtr{1}.Values.Time, ...
Graf_Ten_fase_filtr{1}.Values.Data, ...
Graf_Ten_fase_filtr{2}.Values.Data, ...
Graf_Ten_fase_filtr{3}.Values.Data, ...
strcat('Tensiones de fase',texto_ensayo, 'filtradas a 12 kHz'),...
'V fase A (Vrms)', ...
'V fase B (Vrms)', ...
'V fase C (Vrms)', ...
'Tensiones de fase filtradas\');

% Tensiones de línea
TriplePlot(Graf_Ten_linea{1}.Values.Time, ...
Graf_Ten_linea{1}.Values.Data, ...
Graf_Ten_linea{2}.Values.Data, ...
Graf_Ten_linea{3}.Values.Data, ...
strcat('Tensiones de linea',texto_ensayo),...
'V linea AB (Vrms)', ...
'V linea BC (Vrms)', ...
'V linea CA (Vrms)', ...
'Tensiones de linea\');

% Tensiones de linea filtradas
TriplePlot(Graf_Ten_linea_filtr{1}.Values.Time, ...
Graf_Ten_linea_filtr{1}.Values.Data, ...
Graf_Ten_linea_filtr{2}.Values.Data, ...
Graf_Ten_linea_filtr{3}.Values.Data, ...

```

```

strcat('Tensiones de linea',texto_ensayo, 'filtradas a 12 kHz'),...
'V linea AB (Vrms)', ...
'V línea BC (Vrms)', ...
'V línea CA (Vrms)', ...
'Tensiones de linea filtradas\');

% Tensiones de linea filtradas
TriplePlot(Intensidades{1}.Values.Time, ...
Intensidades{1}.Values.Data(:,1), ...
Intensidades{1}.Values.Data(:,2), ...
Intensidades{1}.Values.Data(:,3), ...
strcat('Intensidades',texto_ensayo),...
'I A (Arms)', ...
'I B (Arms)', ...
'I C (Arms)', ...
'Intensidades\');

```

2.2.2 Caracterización del bus DC. 4 de abril

Resulta conveniente caracterizar el comportamiento del bus DC ya que esta tensión tiene su propia dinámica. Podría pensarse en principio, que en primera aproximación la tensión es estable entorno a una banda, como sucedería si la fuente fuese una batería de litio como la de los vehículos eléctrico. Sin embargo, en nuestro caso, la tensión proviene del rectificador con mucha dinámica y si, por ejemplo, se pretende modelar el sistema de bancada en Simulink convendría saber cómo asciende o desciende la tensión en función de algún parámetro. Para las pruebas en vacío se ha creído interesante en primer lugar estudiar cómo varía la tensión con la velocidad de rotación. o obstante esta dependencia está ligada fuertemente a la configuración del inversor y a cómo gestione éste internamente las comandas, siendo mucho más aconsejable deducir el nivel de tensión del bus en función de la intensidad DC circulante por él en ese momento.

En estos momentos se encuentra únicamente conectada al bus el inversor Bamocar, por lo que toda la intensidad medida va destinada a él, pero, para futuros ensayos en carga, convendría analizar si la relación que se obtendrá ahora es extrapolable a situaciones en las que, adicionalmente, se encuentre conectada la controladora del motor freno. Lo descubriremos en posteriores secciones.

Por el momento, se presentan la tabla 2.4 los resultados de las medidas en los multímetros de la tensión y la intensidad DC donde también ha decidido multiplicarlas para obtener la potencia que demanda el EMRAX, al ser el único que cuelga del bus. Como representación directa de los datos de la anterior tabla se halla la que puede que sea uno de los resultados más útiles e importantes para conocer la dinámica eléctrica de la bancada, la figura 2.6. Se ha hallado que la relación tensión-intensidad en el bus resulta ser 2.2, por lo que de ahora en adelante, si en algún ensayo no ha sido posible tomar nota de la tensión o la intensidad DC, puede utilizarse esta ecuación para continuar con los cálculos.

$$U_{DC} = -11.797 * I_{DC} + 574.38(V_{DC}) \quad (2.2a)$$

Es la situación, por ejemplo, de los ensayos realizados el 26 de marzo, donde sólo en 3 pruebas se llegó a medir la tensión del bus DC. Ahora que contamos con las herramientas para determinar la intensidad, pueden deducirse otras magnitudes, como la potencia DC, que será interesante de analizar como se explica a continuación.

Para cerrar lo obtenido con estos datos, se presentan la gráfica 2.7 que compara la potencia con la intensidad demanda, que no es más que una consecuencia directa de la anterior relación, pero hacer ver la pequeña potencia eléctrica que se consume en un ensayo en vacío, por debajo de los 3kW. También puede verse en 2.8 que las evoluciones de tanto la intensidad como de la tensión en el lado de continua son lineales como habría de esperarse dado la naturaleza del propio bus.

Cabe preguntarse si la potencia consumida en el ensayo es mucha o poca. Para un motor que promete alcanzar los 100 kW de manera puntual y los 40 kW de forma nominal, los apenas 3 kW que se han mencionado parecen despreciables y asociables a pérdidas mecánicas, por calentamiento, etc. Sin embargo, como se comprobará más adelante en otros tests en vacío, las intensidades pueden llegar a alcanzar valores pico nada nimios. En este ensayo, ya llegan a alcanzar los 30 amperios sin ningún problema como se ve en A.20 y,

Tabla 2.4 Caracterización del bus DC. Datos tomados a manos de los aparatos de medida. Ensayo del 4 de abril. Fuente: propia.

N (rpm)	Tensión bus DC (Vdc)	Intensidad bus DC (Idc)	Potencia DC (W)
250	570	0.4	228
500	567	0.5	283.5
1000	558	1.3	725.4
1500	554	2.1	1163.4
2000	541	2.7	1460.7
2500	533	3.5	1865.5
3000	525	4.2	2205
3500	518	4.7	2434.6
4000	512	5.3	2713.6

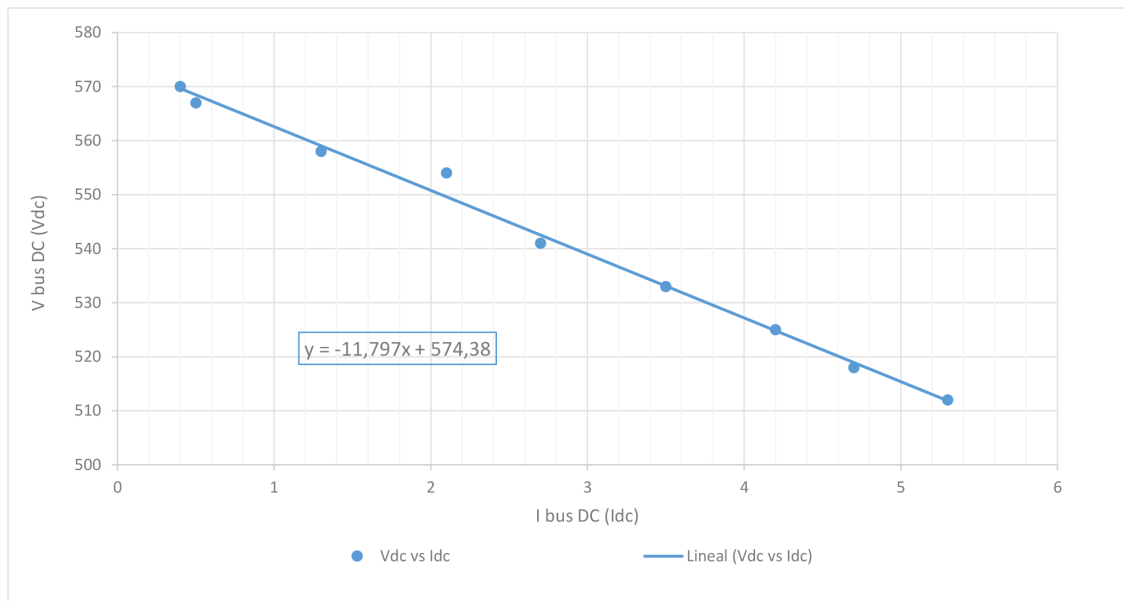


Figura 2.6 Gráfico tensión de vs intensidad de para la caracterización del bus DC en vacío. Ensayo del 4 de abril. Fuente: Propia.

aunque la forma de onda sea caótica y no pueda obtenerse un valor RMS claro cabe preguntarse a qué se ve destinada esa corriente.

Como acaba de mencionarse, si echamos la vista atrás y completamos las tensiones de los ensayos del 26 de marzo podríamos hallar también la potencia eléctrica del bus DC que el inversor demandaba. Aprovechando que se midió con una pinza amperimétrica Fluke la intensidad circulante por la línea A y que este aparato tiene una frecuencia de corte de 500 Hz [4] que elimina la distorsión armónica, se obtuvieron datos acerca de los valores RMS de dicha corriente. Idealmente, si multiplicásemos esos valores por la constante de par del motor, deberíamos obtener el par a vencer en el que se están empleando esos amperios. Por supuesto, sabemos que existe un par, pero es el propio debido a las fuerzas de rozamiento estático y que se han de vencer para poner en rotación a la máquina. Podrían discutirse las diferentes naturalezas de los pares opositores al movimiento que se muestran durante la rotación, pero de cualquier análisis en profundidad se concluiría que no hay ningún par mecánico de más de unos pocos Nm's que se oponga al movimiento. Siendo así, podríamos crear la tabla 2.5 donde ya se encuentran recogido el par resultante de multiplicar la corriente de fase por la constante $k_T = 0.75 \text{ Nm/Arms}$ y también la potencia mecánica correspondiente de considerar la velocidad de rotación del eje en rad/s.

Si bien los resultados arrojados por el cálculo del valor RMS por los aparatos de medida cuando la señal no mantiene una frecuencia constante no puede tomarse como concluyente, como ya se ha insistido en varias ocasiones en este texto, la representación de la supuesta potencia mecánica en el eje junto con la potencia eléctrica absorbida por el inversor y fluyente hacia el motor deja en evidencia la imposibilidad de que la

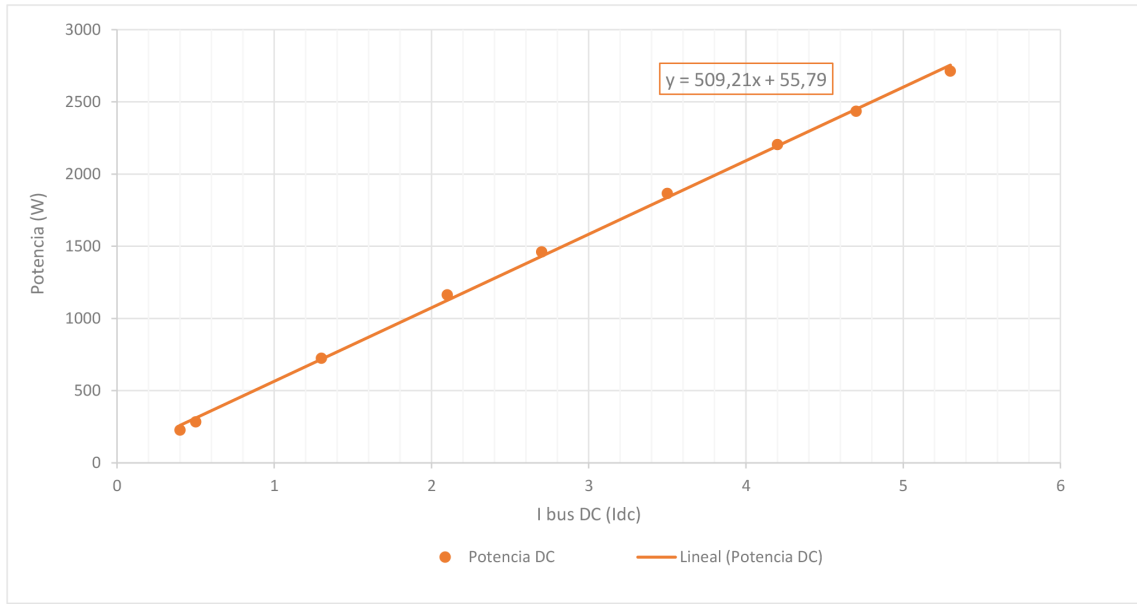


Figura 2.7 Gráfico que enfrenta la potencia DC con la intensidad DC. Ensayo del 4 de abril. Fuente: Propia.

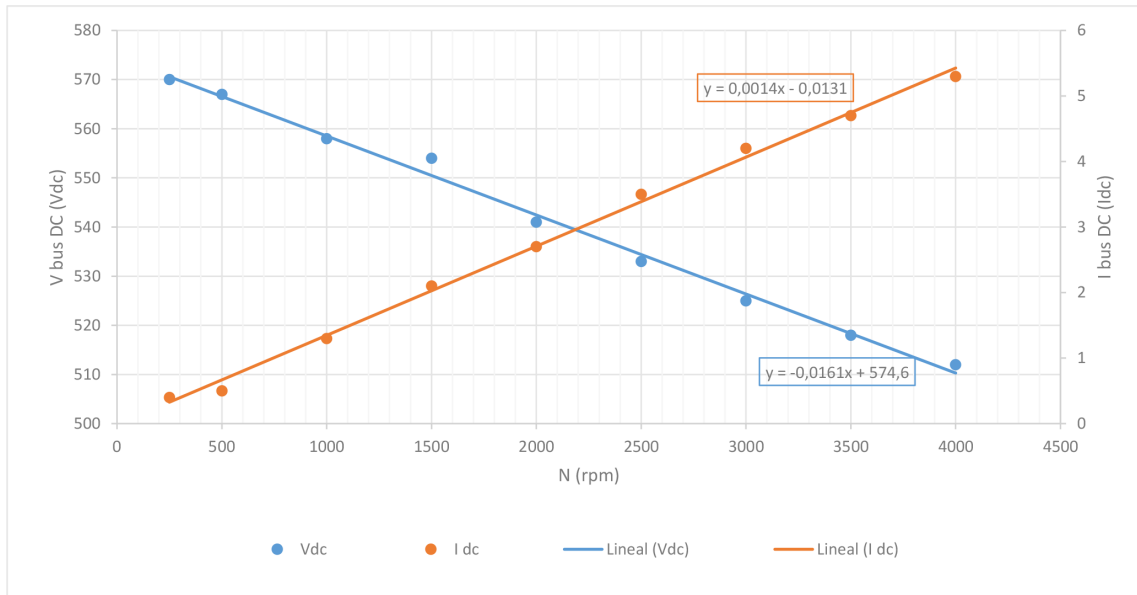


Figura 2.8 Caracterización del bus DC con la velocidad. Fuente: Propia.

energía se estuviese viendo invertida en vencer un par. Como se extrae de la figura 2.9, hay un rango de velocidades donde la potencia mecánica es superior a la eléctrica, hecho que carece totalmente de sentido.

Es de estos resultados de donde extraemos que la intensidad recorriendo los bobinados del motor ha debido invertirse en otra cosa al margen de generar un par electromagnético útil. De inmediato nace la idea de la distorsión armónica.

2.2.3 Característica tensión-velocidad. 10 de junio

Debieron de pasar varios meses hasta que pudiesen llevarse a cabo de nuevo nuevos ensayos en vacío, es más, sólo pudieron momentos antes del desmonte total de la bancada de ensayos. En efecto, hasta que el ART-19e no estuvo preparado para acoger al tren eléctrico de potencia se ultimaron las últimas pruebas y mediciones en el laboratorio y al ser desinstalada la cadena y el acople mecánico al motor freno, surgió una ocasión perfecta para realizar todas aquellas comprobaciones en vacío que, meses atrás, se habían quedado en el tintero bien por que el calendario nos hizo avanzar hacia las pruebas en carga o por un total desconocimiento

Tabla 2.5 Tabla para el cálculo aproximado de la potencia mecánica durante el ensayo en vacío.
Ensayo del 26 de marzo. Fuente: propia..

N (rpm)	Intensidad pinza (Arms)	Par teórico salida(Nm)	Potencia mecánica (W)
492	1,5	1,125	58,904
1440	2,2	1,65	172,787
1920	5,1	3,825	801,106
2460	7,4	5,55	1464,610
2820	9,3	6,975	2191,260
3300	11,8	8,85	3243,694
3720	13,7	10,275	4303,981
4140	16,1	12,075	5728,144

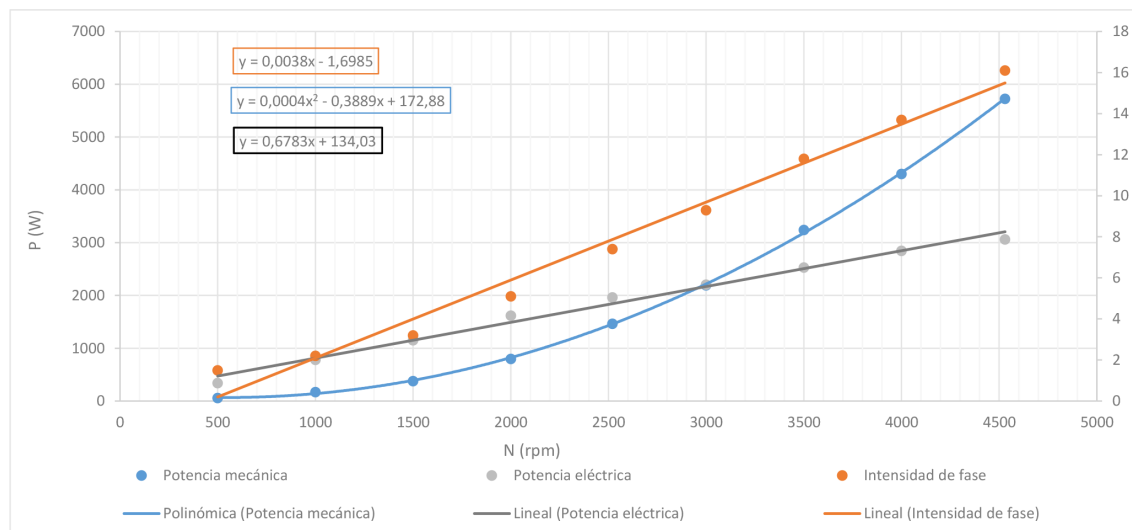


Figura 2.9 Comparación de la potencia eléctrica utilizada representada con la correspondiente potencia mecánica. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia.

de qué tests aportarían nueva información. Así pues, se volvieron a inspeccionar ciertos puntos del mapa de velocidades esta vez con un mejor conocimiento y manejo tanto del inversor como de la toma de datos.

La manera de proceder en estos últimos ensayos en vacío estuvo influenciada por la experiencia adquirida durante los ensayos en carga, donde se usó irremediamente las órdenes manuales en par. Aquí, se enviaba una consigna de par y se controlaba el régimen de velocidad alcanzado manipulando el límite permisible de velocidad en Bamocar. Indiscutiblemente, los resultados obtenidos en cuanto a suavidad en las aceleraciones y deceleraciones, de lo que también se ve beneficiado el bus DC. Uno de los misterios que se quedaron sin respuesta durante mucho tiempo fue el hecho de que el motor no llegara a embalsarse cuando se le consignaba un cierto par. La teoría nos hacía pensar que en cuanto una comanda de par motor se enviara, la máquina se embalaría hasta desconectar por el aviso de alguna protección pero la realidad fue bien distinta. Cada vez que el EMRAX era consignado un cierto par, tras una aceleración, se llegaba a un régimen de velocidad que no sería superado hasta que otra comanda mayor a la anterior se enviase al inversor. El efecto resultaba ser el de la existencia de un par contrario al movimiento que se intentó caracterizar. Sin embargo, como hemos discutido al final de la anterior sección, los resultados muestran que esta acción no es la más factible.

Uno de los puntos claves en estas pruebas fue el mejor entendimiento de los dos bucles principales del inversor. Por un lado, el bucle de par no es más que el bien conocido control de corrientes de cualquier inversor, consistente en dos controladores proporcional-integral y cuya sintonización permite influir en la aceleración del vehículo. Por su parte, el control de velocidad es conocido teóricamente por aportar un controlador PI adicional, pero en la práctica no resulta clara la manera de actuar en Bamocar. Esa fue la razón por la que se decidió desconectar el control de velocidad en el inversor durante el tramo final de los tests para lo que fue necesario, como indica el manual [19], no imponer un límite de velocidad. Ni que decir tiene que esto no resultaba en un estado peligroso ni para el motor ni para el inversor, pues este último

posee otras etapas de seguridad como el control de las sobretensiones o las sobreintensidades. Una mayor velocidad implica un mayor nivel de tensión, llegando esto a ser un problema en muchas de las pruebas ya que el vigilante de sobretensión del inversor se activaba ante ascensos brusco en velocidad debido a los picos de tensión derivados de esto en el bus DC. Es por ello que se Bamocar fue configurada de forma que ante un embalamiento las tensiones e intensidades quedasen lejos de sus límites superiores y se permitió que la velocidad alcanzase potencialmente el 100 % de lo permitido, es decir, 5000 rpm, que también queda lejos del límite pico de 6500 rpm.

Otros puntos de la configuración remarcables por haber cambiado son la frecuencia de conmutación, que se cambió a 12 kHz, heredados de conclusiones alcanzadas durante los tests en carga y que pueden resumirse en la menor presencia de distorsión y una gestión más eficiente de la energía a costa de un mayor calentamiento. Por otro lado, los límites de las intensidades nominales y pico fueron elevados al valor máximo permitible del 85 % en ambos registros con lo que se daba vía libre al motor para demandar tanta intensidad fuese necesaria para desarrollar el par consiguado.

Todas estas medidas disiparon toda duda acerca de lo que debía ser innegable por teoría elemental: ante una consigna de par en vacío, el motor dispara su velocidad. Si bien es cierto que esto no ocurre hasta una cierta comanda de par ahora se confirma que no existe ningún par limitante creado de manera natural por el motor que originara el estancamiento en velocidad antes descrito. Que el embalamiento no ocurriese en los anteriores ensayos no es más que el fruto de una mezcla entre un control secundario en velocidad y una insuficiente capacidad de generar la intensidad necesaria.

Con todo esto ya dicho, los diez últimos tests en vacío se presentan a continuación, donde habría que puntualizar que en primer ensayo marcado como 0 rpm es el resultado de consignar un par y que el motor no se mueva, por lo que la forma de onda resulta ininteligible. El último ensayo a 4000 rpm por su lado, es aquel que describe el mencionado embalamiento. Todas las formas de onda son consultables en el apéndice Apéndice B y sus diferentes secciones, pues son demasiadas para presentarlas en el actual capítulo.

Si se inspecciona una gráfica, por ejemplo B.3, puede apreciarse que las ondas están cargadas de distorsión con lo que si realizamos el cálculo del RMS aparecerán también las componentes armónicas que harán enmascararían el fundamental, que es la componente que viene descrita en la hoja de características. Una buena solución sería aplicar un filtro paso bajo.

El filtrado se computaría de forma digital en Simulink conocida su función de transferencia. Al preguntarnos qué filtro y con qué frecuencia de corte usar conviene tener presente la figura 2.10 donde se puede estudiar cómo afecta un tipo de filtrado y otro al módulo y el desfase de la magnitud tratada. Conviene utilizar un filtro que afecte lo menos posible al módulo, pues no queremos que por el hecho de filtrar la magnitud se vea atenuada y, con respecto a la fase, no es de vital importancia conservarla, por lo que no es un parámetro decisivo. Se observa que los filtros de primer orden tienen una pendiente menos agresiva y actuando décadas antes que un filtro de segundo orden. Evidentemente conviene utilizar un filtro de segundo orden con una frecuencia de corte de 12 kHz, que es donde conocemos que se dará el primer armónico. Como se trata de un filtro virtual y que no va a requerir se implementado analógicamente, escogemos un coeficiente de amortiguamiento de valor unidad. Con esto, nos aseguramos que en el rango de frecuencia en las que se encontrarán las componentes fundamentales en cada test, que es por debajo de 1kHz, la señal no se verá atenuada. Esto último recordamos que es conocido al disponer de las velocidades de giro y poder ser convertidas a frecuencias eléctricas mediante 2.1.

Con todo esto, se obtuvieron las gráficas en B.2 que fueron sometidas a un análisis frecuencial utilizando la herramienta FFT analysis del paquete Simscape de Simulink, que no hace otra cosa más que aplicar la transformada rápida de Fourier a la señal. Si nos fijamos, puede verse claramente que las componentes protagonistas del espectro armónico son las de orden tercero (36 kHz) hasta los 875 rpm, a partir de donde siguen persistiendo hasta el último régimen el primer y segundo armónico (12 y 24 kHz respectivamente). De igual manera, al obtener las tensiones de línea en B.4 como dicta la teoría, son los armónicos impares los que desaparecen, pero por otro lado cobran protagonismo el segundo y cuarto (48 kHz), estando presente sobre todo la componente de 24 kHz.

Del ya discutido filtrado resultan unas ondas de forma mucho más senoidales, que al ser dispuestas en el espectro frecuencial dan como resultado las gráficas expuestas en B.3 y B.5. Aquí se hace notable la reducción de la distorsión armónica hasta tal punto que la componente protagonista en casi todos los regímenes de velocidad es la fundamental. Estos será clave en el cálculo del valor RMS ya que nos acercará a valores más verosímiles para su comparación con la hoja de características del motor.

Sin más rodeos se procede a presentar dos tablas con los valores cuadráticos medios de los cuatro tipo de ondas, esto es, tanto de fase y línea como filtradas y sin filtrar.

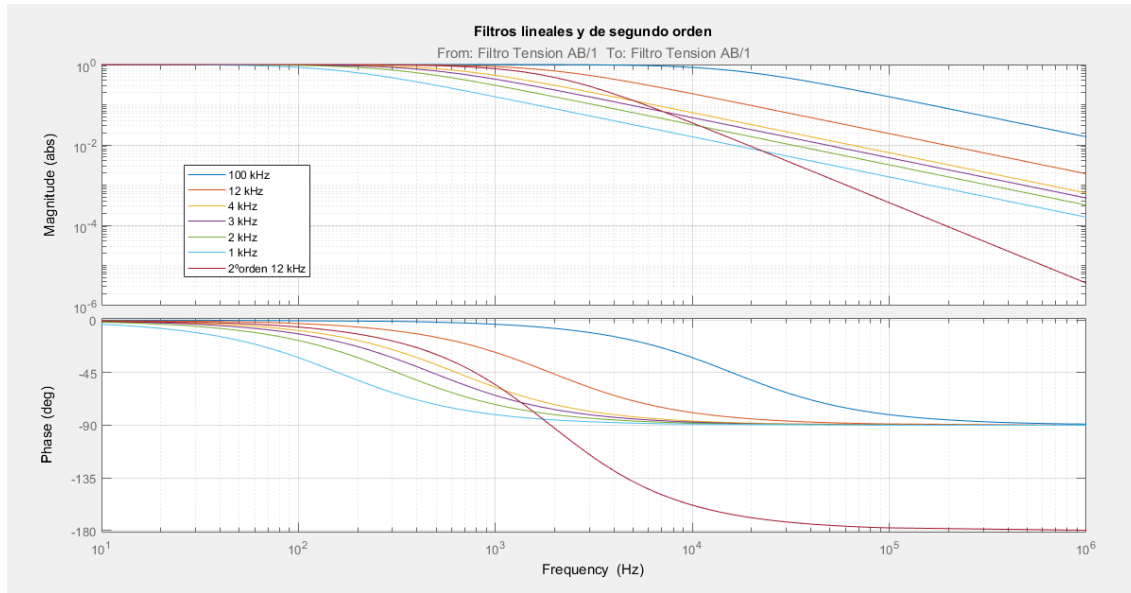


Figura 2.10 Diagrama Bode de comparación de los posibles filtros a usar en el procesamiento de las señales con distorsión. Fuente: Propia.

Tabla 2.6 Valores RMS de las tensiones de fase sin y con filtrado a 12 kHz. Fuente: propia.

N (rpm)	V_{fase}^A (Arms)	$V_{fase\ filtrada}^A$ (Arms)	V_{fase}^B (Arms)	$V_{fase\ filtrada}^B$ (Arms)	V_{fase}^C (Arms)	$V_{fase\ filtrada}^C$ (Arms)
0	54,940	17,317	47,087	14,498	53,882	16,944
215	58,493	12,727	52,912	12,425	163,716	24,094
555	76,816	30,754	73,708	30,926	76,226	30,191
875	98,017	47,230	96,710	48,201	98,485	47,787
1210	119,600	63,392	116,894	62,526	119,768	63,217
1530	142,035	79,380	141,391	79,709	142,598	80,014
1880	167,454	98,064	165,271	97,980	167,248	97,983
2215	190,813	116,860	189,728	116,531	191,782	116,773
2811	224,462	144,246	222,220	144,377	225,549	145,568
4000	289,116	206,711	286,186	205,377	291,558	206,276

Tabla 2.7 Valores RMS de las tensiones de línea sin y con filtrado a 12 kHz. Fuente: propia.

N (rpm)	$V_{línea}^{AB}$ (Arms)	$V_{línea\ filtrada}^{AB}$ (Arms)	$V_{línea}^{BC}$ (Arms)	$V_{línea\ filtrada}^{BC}$ (Arms)	$V_{línea}^{CA}$ (Arms)	$V_{línea\ filtrada}^{CA}$ (Arms)
0	14,166	2,208	10,848	1,381	9,889	1,507
215	41,638	21,088	147,765	16,590	148,835	16,479
555	92,661	52,475	85,806	51,516	82,924	51,468
875	139,855	79,652	140,365	80,637	132,830	78,980
1210	187,403	103,494	178,556	103,839	174,987	104,616
1530	223,365	128,621	217,778	129,997	217,041	127,838
1880	270,920	153,984	261,659	152,525	261,300	154,087
2215	310,973	176,601	307,961	176,624	298,512	177,886
2811	370,137	206,211	368,003	206,197	365,966	207,080
4000	489,433	253,494	486,540	256,559	500,791	255,575

Finalmente, pueden representarse los resultados de los test en vacío en las gráficas 2.7. Recordamos que la pendiente teórica se sitúa en los 0.0478 Vrms/rpm según la hoja de características, por lo que el lector podrá comprobar que existe una discrepancia de casi el doble en las tres tensiones. El filtrado reduce o elimina las componentes armónicas y sin duda hace que la pendiente se relaje de entorno a 0.12 a 0.07 Vrms/rpm pero indudablemente se ha determinado que en la práctica el motor queda lejos de cumplir lo que el fabricante asegura. Esta información es vital para un mejor entendimiento de la máquina, un mejor diseño del paquete de baterías, así como un correcto modelado y, por supuesto, para el depurado de futuros problemas en pista.

Algo descontentos por los resultados obtenidos tras las pruebas finales, se decidió en un soplo de inspiración, representar los resultados obtenidos para las tensiones de fase y, para el asombro de un servidor, los datos

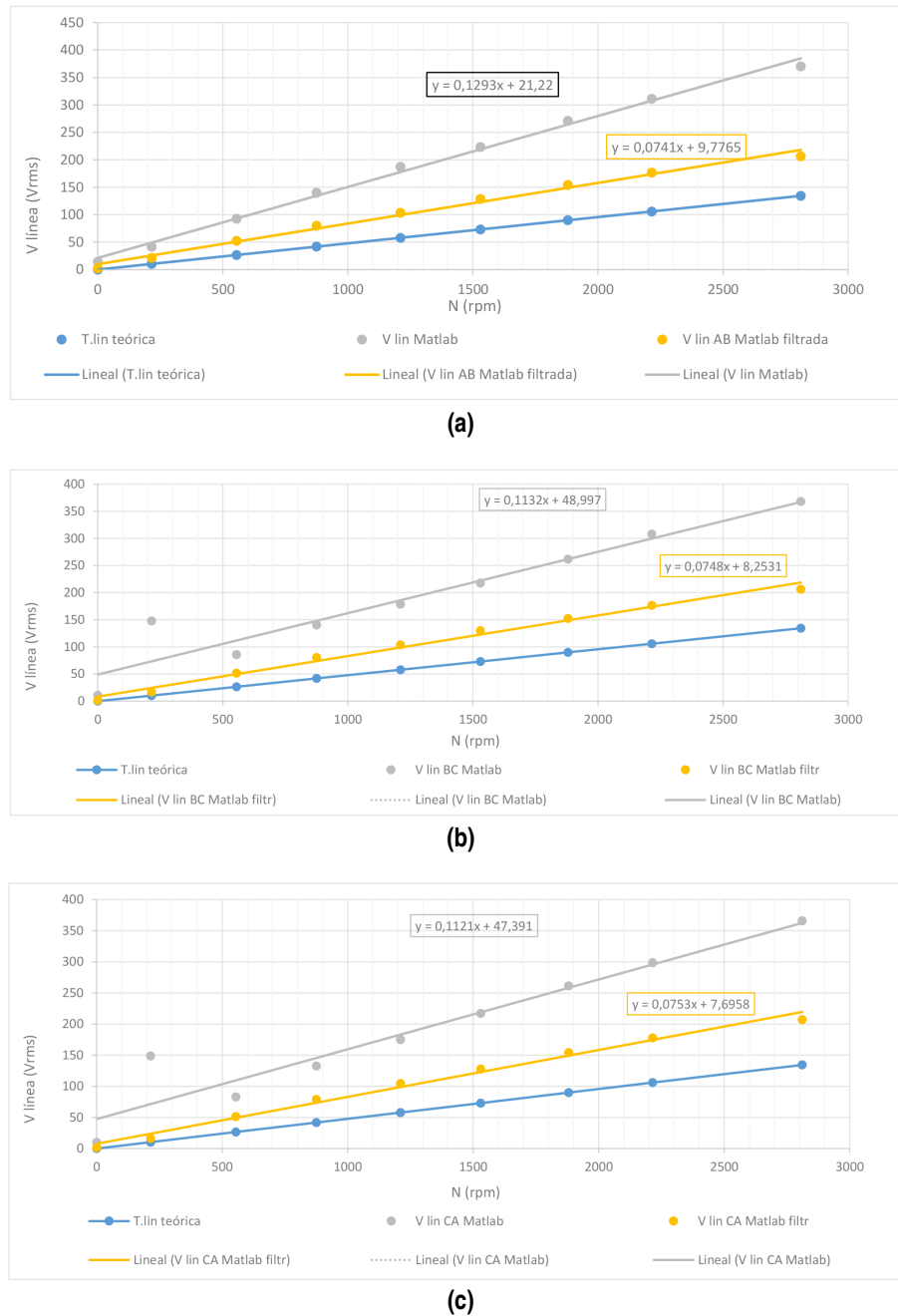
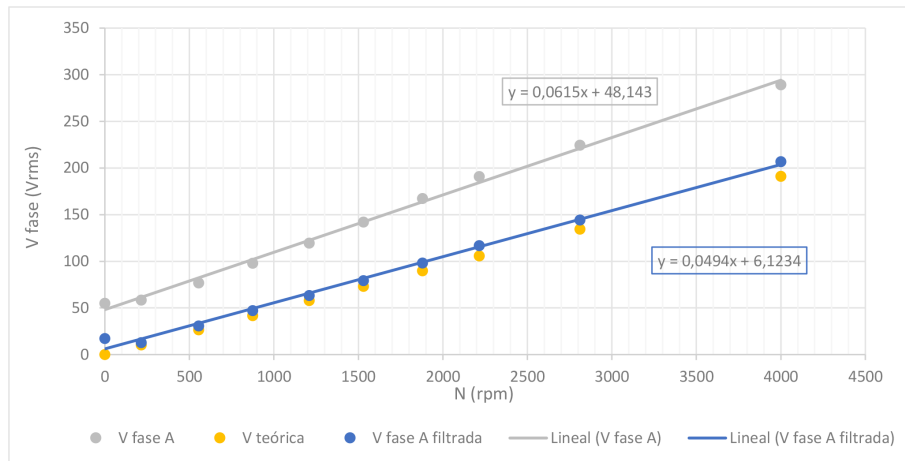


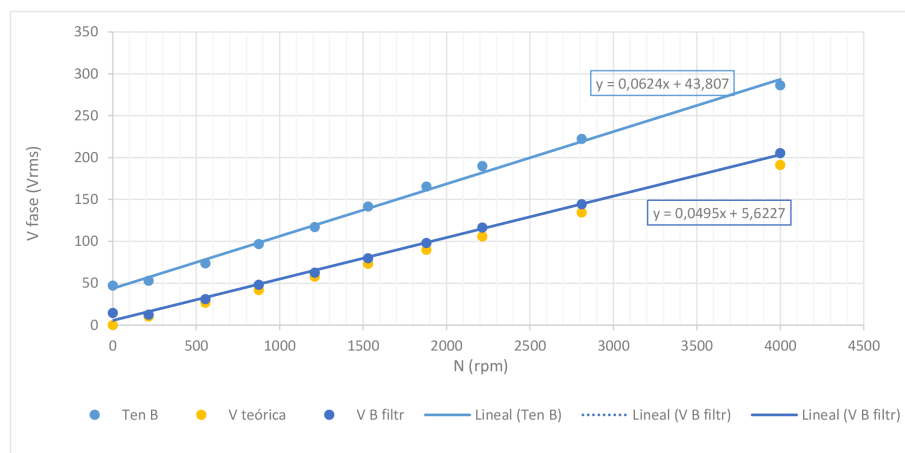
Figura 2.11 Representación de la característica tensión de línea-velocidad del motor. Se comparan los resultados con las ondas en bruto y filtradas a 12 kHz con la pendiente teórica del motor. Fuente: propia.

encajaban perfectamente con la constante de tensión del motor. Como se observa en las gráficas de la figura 2.11 los valores RMS que adoptan las magnitudes una vez filtradas están casi solapadas con la curva teórica, tendiendo incluso un paso por cero y una pendiente de entorno a 0.049 Vrms/rpm. No es un resultado que se esperara, dado que en la hoja de características reza claramente "between two lines" al lado de la constante de tensión, pero sin duda es demasiado sospechoso como para no precise, mínimamente de una conversación por email con EMRAX.

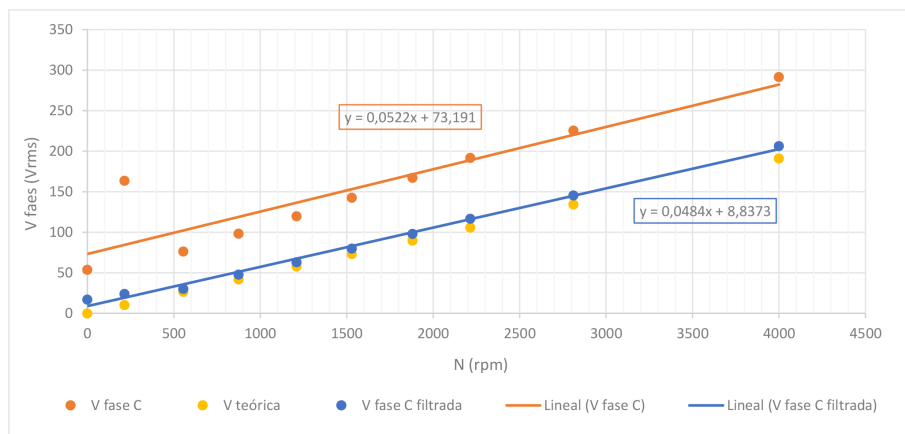
Para más sospecha, Unitek, recordemos la marca fabricante del inversor, lanzó una serie de nuevos documentos y manuales donde explicaba ciertas cosas que, sin duda, en sus guías de usuario quedaban pobremente explicadas. Entre ellas, en el FAQ [20] se mencionan los test a efectuar para comprobar la característica de tensión del EMRAX 228 HV, el modelo de alta tensión de nuestro motor. Durante todo el



(a)



(b)



(c)

Figura 2.12 Representación de la característica tensión de fase-velocidad del motor. Fuente: propia.

razonamiento se trabaja con tensiones de fase y, al finalizar y comparar con la hoja de características, si bien toman la constante 0.0730 que sigue rezando "AC voltage between two phases" también en el modelo de alta tensión, el resultado viene dado en " U_{ph} ". Un extracto de este manual es el que puede observarse en la figura 2.13.

Todo esto nos lleva a pensar que las medidas y resultados obtenidos han pasado de ser algo cercano a una decepción a convertirse en un profundo éxito, vista la forma de las curvas 2.12. Ahora podemos afrontar una

A different way is to use the motor specific data (if provided) depending on the motor speed (with field weakening not in use)

Example from Emrax 228 motor:

AC voltage between two phases [Vrms/1RPM]	0,0730	0,0478	0,0176
---	--------	--------	--------

Test for confirmation:

- $K_n = 0,073 \text{ Vrms/1 rpm}$ (Emrax 228 HV)
- $n_{\text{actual}} = 1500 \text{ rpm}$
 - $U_{\text{ph_measured}} = 105,7 \text{ Vrms}$
 - $U_{\text{ph_Kn}} = 109,5 \text{ Vrms}$

Figura 2.13 Captura del FAQ de Bamocar que hace sospechar que la constante no está expresada en tensión de línea, si no en magnitud de fase. Fuente: [20].

conversación con EMRAX con unas pruebas de respaldo en las manos.

3 Ensayos en carga

En el espacio temporal nos situamos a principios de mayo, cuando la transmisión mecánica y el acople con el motor freno fueron montados en el banco de pruebas. En paralelo desde los ensayo en vacío se había estado investigando cómo controlar la máquina síncrona BLS-192 propiedad del Depto. de Ingeniería Eléctrica y parecía no suponer un problema, dado que ya se había hecho funcionar durante la pasada temporada, aunque brevemente. Sin embargo, de las charlas con los anteriores encargados de realizar las pruebas, nos admitieron que los principales problemas y paradas técnicas eran causadas por este componente.

Controlado por la ya mencionada ECU de la marca Infranor, el motor tiene cargado un software que simula la inercia vehicular y las fuerzas del entorno al que se enfrentará el ART-19e. Este software es compilado dentro de una suite que es únicamente programable en lenguaje PASCAL, lo cual favorece la robustez y fiabilidad, pero por otro lado impide la fácil depuración de problemas y la inteligibilidad del código. Uno de los principales inconvenientes de este antiguo lenguaje de programación es que no trata con flotantes, por lo que todos los números han de ser enteros, o, en su defecto, ejecutar las operaciones en el orden necesario para no desbordar los registros. Una de las fuerzas opuestas a la rodadura más descriptivas del monoplaza es la fuerza de inercia, que desaparece en cuanto se alcanza una velocidad fija y, como bien es sabido, su cálculo involucra una derivada y en este caso discreta. En el código 3.1 puede comprobarse cómo a veces es necesario multiplicar y dividir por el mismo número para evitar problemas de desbordamiento o de ruido. También se aprecia la derivada discreta de la velocidad $dv := ((v_t - v_{tm1})/200) * 200$ que será usada más adelante para el cálculo de la fuerza de inercia.

Si se está haciendo tanto hincapié en este código es porque ha supuesto el principal caballo de batalla este año en la bancada. El motor freno ha sido responsable de embalar el eje en las operaciones en par debido, precisamente, por un cálculo poco acertado de la mencionada fuerza de inercia. Tras muchas horas de intentos y depuración del código para evitar a toda costa el desbordamiento de los registros, no se terminó de poder dominar esta máquina y se han establecido conversaciones con el fabricante para determinar qué parte de la cadena de control es el foco del problema. La temporada avanzada inevitablemente y había de encontrarse una solución de compromiso. En las etapas donde el comportamiento del BLS-192 era continuamente errático, se optaba por escalar las pruebas, esto es, se simulaba una masa vehicular más pequeña a la real para evitar la amplificación excesiva en el cálculo de la derivada.

Código 3.1 Código cargado en el motor BLS-192 para la simulación de las fuerzas opositoras al movimiento.

```
var

torque_actual=0x6077,0; (*En curr*)
torque_max; (*Par maximo, en Nm*)
velocidad_ref=0x60FF,0; (*Se mete en INC/S, no se emplea en este
caso*)
torque_ref=0x6071,0; (*Se mete en curr*)
velocidad_maxima=0x6080,0; (*Se mete en RPM, no se emplea en este caso*)
intensidad_maxima=0x6073,0; (*Se mete en A*)
rpm2incs; (*Convierte las RPM en INC/S*)
A2curr; (*Convierte los A en curr*)
```

```

Nm2curr; (*Convierte Nm en curr*)
Kt; (*Constante de par, en Nm/A*)
v_t=0x606C,0; (*Velocidad actual*)
v_tm1; (*Velocidad iteracion previa*)
paso; (*Tiempo entre iteraciones, ms*)
a;
b;
c;
d;
e;
dv;
t;

end_var

begin

(*Ambito global:*)
(*Parametros:*)
rpm2incs:=4096/60
A2curr:=252184/10000
Kt:=237/100
Nm2curr:=10641/1000
(*Limites de funcionamiento:*)
torque_max:=200
intensidad_maxima:=torque_max*Nm2curr (*Pasamos el limite definido de par
maximo a corriente, en curr*)

(*Operacion en Par:*)
torque_ref:=0
t:=0
paso:=50
while 0=0 do
delay(paso)
dv:=((v_t-v_tm1)/200)*200 (*Para quitar ruido*)
a:=(941*dv*paso)/10000/1000
b:=6574/100
c:=v_t*v_t
d:=c/10000

e:=(d*498)/1000000
torque_ref:=- (a+b+e)
v_tm1:=v_t
t:=t+1
end_while
end

```

Con este problema siempre presente en la mente se va a proceder a describir los resultados obtenidos de las pruebas en carga en esta temporada, donde recordemos que los principales objetivos eran comprobar la constante de par del motor y vislumbrar algo de luz sobre la relación entre los parámetros de Bamocar que ayuden a crear un mejor modelo en Simulink.

3.1 Ensayos con motor freno bloqueado

La posibilidad de efectuar ensayos a rotor bloqueado fue cotejada por el personal de bancada y, si bien fue diseñada una estructura de acero anclara la corona del EMRAX, no pudo manufacturarse por implausabilidad

en la logística del equipo, quedando como tarea pendiente para el próximo curso. Es por eso que un servidor no se ha atrevido a llamar a los siguientes ensayo "a rotor bloqueado", ya que la solución que se adoptó para solventar la falta de anclaje mecánico fue fijar a velocidad nula el motor freno BLS-192 mediante software. Si bien no es la solución ideal, funcionó a la perfección dada la escala a la que se efectuarán las pruebas, no suponiendo un riesgo para el motor freno por imponerle un par superior al que pueda soportar. Mientras el motor freno esté consignado a velocidad nula, demandará la intensidad que sea necesaria para soportar el par impuesto en su eje por el EMRAX y no perder el estado de velocidad nula.

Esta es en teoría una situación estresante para el motor, donde en las bancadas de ensayo comerciales se vigila constantemente la temperatura y la intensidad en las fases. En nuestro caso, al estar los límites de operación aún difusos, no nos arriesgaremos a demandar un par demasiado grande, pues aún se estaba aprendiendo a operar el banco de pruebas. El procedimiento, no obstante, no requiere demasiada explicación, ya que el protocolo es el que sigue:

- Consignar el motor freno BLS-192 a velocidad nula.
- Dar una consigna en par al EMRAX 228.
- Medir las magnitudes oportunas.
- Consignar el EMRAX 228 a par nulo para evitar calentamientos excesivos.

La principal novedad de estos ensayos con los realizados hasta la fecha es la posibilidad de medir el par impuesto, que se supondrá el mismo en valor absoluto para ambos ejes mediante el dinamómetro instalado en el BLS-192. La información es mostrada en la interfaz de la controladora en las unidades "curr" que son las equivalentes a las Num de NDrive en este software y como tales, tienen un factor de conversión a Nm consultable en el código 3.1. Esta información es la que se recoge en la tabla 3.1 y se representan para mayor claridad en la figura 3.1. Este último gráfico y la ecuación de tendencia 3.1 que ahí consta será utilizado en varias ocasiones para calcular el par que debería poder desarrollar el EMRAX ante una cierta consigna. Un dato importante acerca de estos ensayos y que debe tenerse en cuenta, es que se pretendió llevar al EMRAX a su límite, dentro del pequeño rango de pares que se pudo parametrizar. Para ello, la frecuencia de conmutación se estableció en **16 kHz**. Las diferencias entre los distintos modos de conmutación serán introducidas y discutidas más adelante en este capítulo, pero por ahora sólo hay que mantener a la frecuencia a la que se realizó este ensayo es la más exigente en términos de esfuerzo por parte del inversor debido a la eficacia del control en su interior.

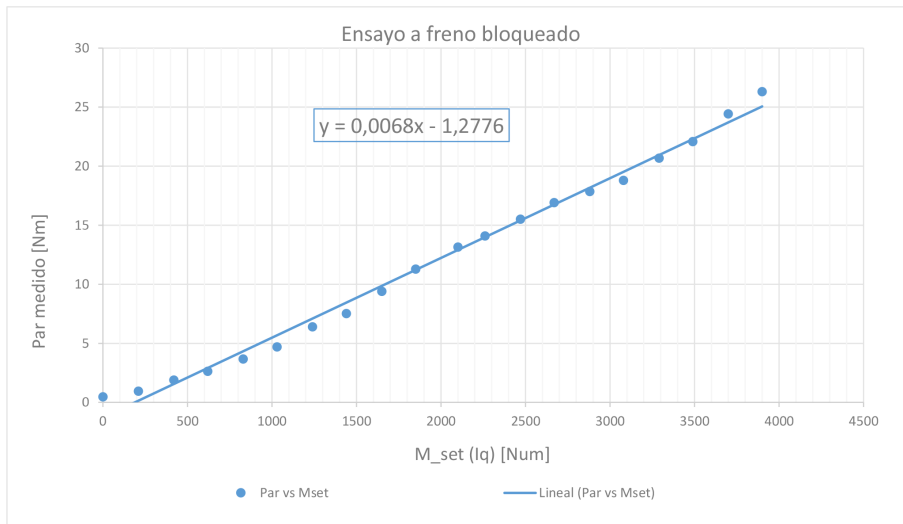


Figura 3.1 Gráfico que muestra la correspondencia entre la consigna M set y el par desarrollado en el ensayo a freno bloqueado. Fuente: Propia.

$$T_{motor} = 0.0068 * M_{set} - 1.2276[Nm] \quad (3.1a)$$

Tabla 3.1 Datos correspondientes al ensayo a freno bloqueado. Fuente: Propia.

M_set (Num)	Par actual freno (curr)	Par actual freno (Nm)
0	5	0,4698807
210	10	0,9397613
420	20	1,8795226
620	28	2,6313316
830	39	3,6650691
1030	50	4,6988065
1240	68	6,3903768
1440	80	7,5180904
1650	100	9,397613
1850	120	11,277136
2100	140	13,156658
2260	150	14,09642
2470	165	15,506061
2670	180	16,915703
2880	190	17,855465
3080	200	18,795226
3290	220	20,674749
3490	235	22,084391
3700	260	24,433794
3900	280	26,313316

3.2 Ensayos tipo Acceleration

Nos encontramos ante los ensayos en los que se encontraron sin duda más complicaciones ocasionadas por el comportamiento del motor freno comentado antes y es a esto que se debe el reducido número de puntos que pudieron analizarse. Aún así, a este punto de la temporada se llegó con un conocimiento más amplio acerca de la toma de medidas que en las pruebas en vacío, por lo que se dispone de multitud de gráficas extraídas del osciloscopio y procesadas en MATLAB®. Para su consulta se han dispuesto todas en el Apéndice C la representación temporal de las intensidades y ambas tensiones, de fase y línea si bien esta vez no ha sido necesario el filtrado en las dos últimas magnitudes dado el espectro frecuencial de las mismas que se puede examinar en el Apéndice D. Las formas de onda de las corrientes como la mostrada en 3.2 parecen coincidir con las mostradas en otros trabajos teóricos, como el de M. Spichartz en 2010 [17] por lo que la toma de datos en el osciloscopio parece correcta. Como era de esperar, comenzar a trabajar en carga el contenido armónico tanto en onda de intensidad como de tensión ha disminuido notablemente, si bien ahora están presentes armónicos de orden menor a la frecuencia de conmutación, que en este ensayo fue de **12 kHz**, y que desaparecen a medida que las consignas de par aumentan. Por su parte, la tensión posee mas ruido que en los ensayos en vacío por el PWM imperante en el control. De hecho, si no llegamos a observar una onda cuadrada típica de la modulación PWM es debido a que el osciloscopio actúa como filtro paso bajo cuando la frecuencia de muestreo supera un cierto umbral como puede leerse en su manual del usuario [21].

De todas las ondas mostradas en los apéndices son analizables sus valores RMS, de los cuales nos interesan especialmente aquellos de las señales de intensidad para conseguir completar la perseguida curva que relacione el par desarrollado con la intensidad de fase. No obstante, también es interesante conocer el comportamiento de las demás magnitudes con respecto a la consigna dada y es por eso que en la figura 3.2 se muestran los valores RMS de las principales magnitudes eléctricas con respecto a la consigna M set, así como su representación en los gráficos 3.3. Con estas relaciones se podrá establecer nuevos límites de operación como se explicará más adelante.

No hay que olvidar que sin duda el resultado más importante a extraer de este ensayo es el que se esconde en la tabla ??, donde se han reunido los valores necesarios para enfrentar en la figura ?? el par desarrollado en el eje con la intensidad que recorre cada una de las fases del motor. Los resultados mostrados son de un gran valor para el entendimiento del tren eléctrico de potencia, pero, ¿cómo podemos saber si son correctos? La comparación lógica es con la constante de par ofrecida por el fabricante $k_T = 0.75 Nm/Arms$ y disponible

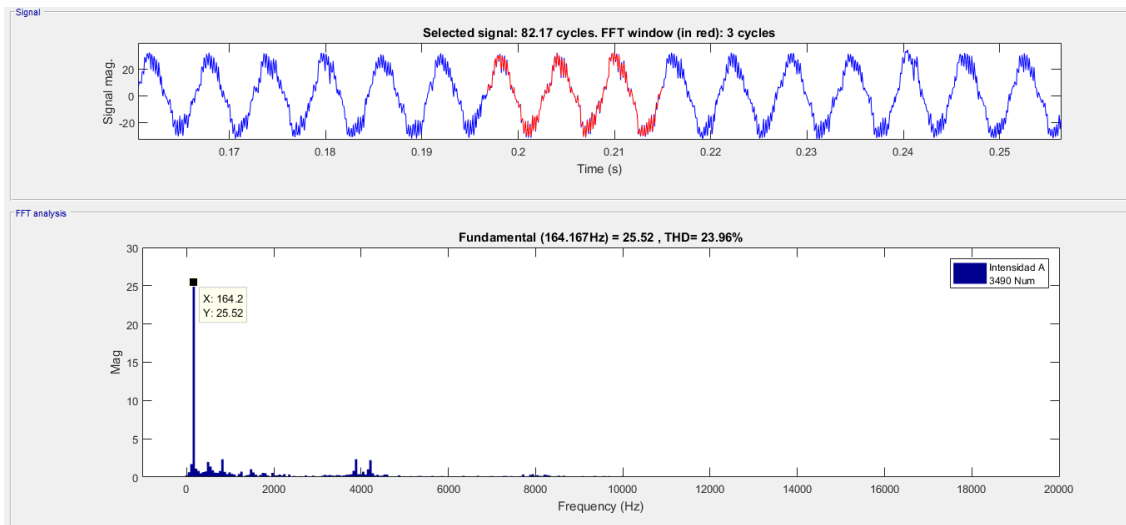
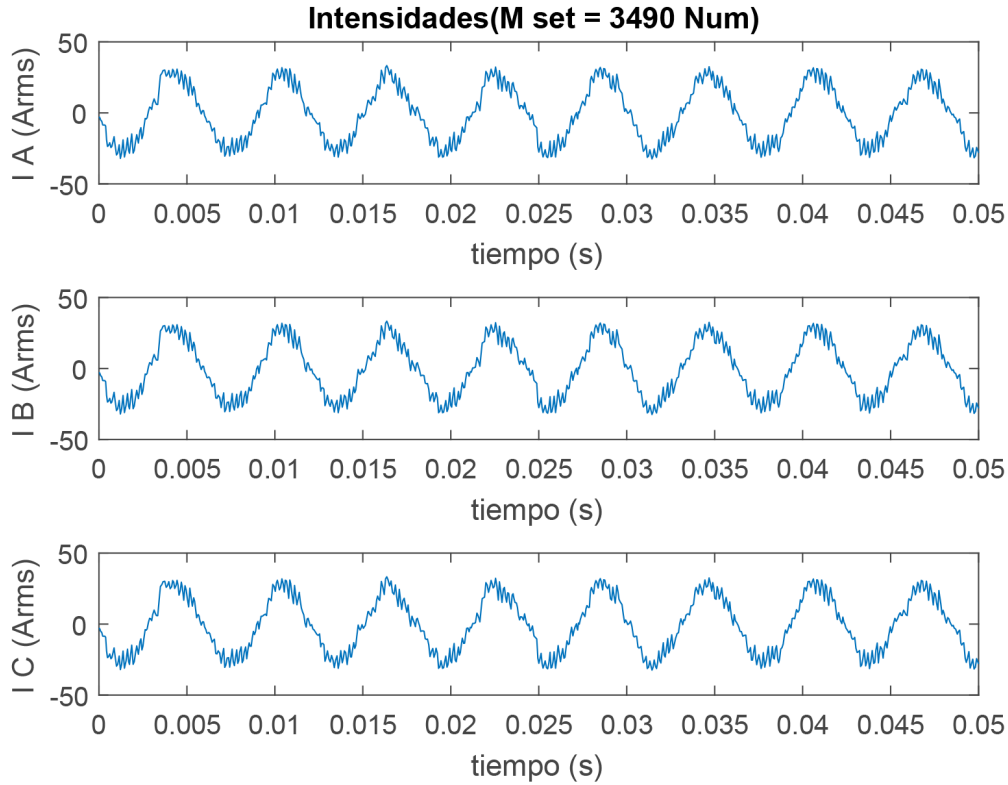


Figura 3.2 Extracto de los apéndices C y D para mostrar la forma de onda típica de estas aplicaciones de potencia en el EMRAX 228 y su contenido armónico. Más gráficas en Apéndice C y Apéndice D. Fuente: Propia.

en la tabla 1.2, pero evidentemente, la realidad tenderá a alejarse de esa curva. Tal es así que, en los tests realizados al modelo 228 HV del EMRAX, la universidad de Darmstadt -capítulo 2 del FAQ [20]- constató que existían discrepancias con la constante de par del 20 %. De ese modo, se podría hacer una analogía para nuestro modelo 228 MV, aplicando la misma proporcionalidad a nuestra constante de par como se muestra en 3.2. Lo que a priori no pueda parecer un método exacto para encontrar una referencia teórica resulta funcionar espléndidamente con nuestros resultados. Tanto es así, que si se vuelven a comprobar las pendientes de las

Tabla 3.2 Tablas de valores RMS de las principales magnitudes del ensayo Acceleration. Fuente: propia.

(a)

N (rpm)	M_set (Num)	Tensión A (Vrms)	Tensión B (Vrms)	Tensión C (Vrms)
-470	1440	52,839134	60,17638	65,339006
-660	2100	63,362534	72,632129	77,310406
-800	2670	72,790972	84,473561	86,042057
-985	3490	85,308544	97,183347	100,0232
-1080	3900	92,26427	104,43947	105,52331

(b)

N (rpm)	M_set (Num)	Tensión AB (Vrms)	Tensión BC (Vrms)	Tensión CA (Vrms)
-470	1440	81,548446	79,615552	82,994678
-660	2100	102,79032	107,9723	103,18854
-800	2670	121,32046	129,12506	119,77805
-985	3490	145,57133	159,83086	145,22904
-1080	3900	155,93541	171,21087	155,45055

(c)

N (rpm)	M_set (Num)	Intensidad A (Irms)	Intensidad B (Irms)	Intensidad C (Irms)
-470	1440	7,9823877	8,1061309	8,8654605
-660	2100	11,494092	11,896208	12,777797
-800	2670	14,693828	15,160831	16,391857
-985	3490	19,157717	19,319955	21,221367
-1080	3900	20,849936	21,069285	22,968625

curvas en 3.4, sus valores oscilan entorno al 0.64 para dos de las fases y al 0.58 para otra. ¡La característica en par queda verificada!

Tabla 3.3 Datos para la caracterización de la curva par-intensidad del motor. Fuente: Propia.

M set (Num)	Par medido (curr)	Par medido (Nm)	Intensidad A (Irms)	Intensidad B (Irms)	Intensidad C (Irms)
1440	22	2,06747486	7,98238772	8,1061309	8,86546045
2100	43	4,04097359	11,4940919	11,8962079	12,7777965
2670	64	6,01447232	14,6938277	15,1608312	16,3918567
3490	98	9,20966075	19,1577169	19,3199551	21,2213674
3900	107	10,0554459	20,8499356	21,0692846	22,9686245

$$K_{T\text{terica}}^{228HV} = 1.1(Nm/Arms) \rightarrow K_{T\text{real}}^{228HV} = 0.93(Nm/Arms) \quad (3.2a)$$

$$K_{T\text{terica}}^{228MV} = 0.75(Nm/Arms) \rightarrow K_{T\text{real}}^{228MV} = x(Nm/Arms) \quad (3.2b)$$

$$K_{T\text{real}}^{228MV} = 0.6341(Nm/Arms) \quad (3.2c)$$

3.2.1 Estudio de la potencia en el test

Siempre conviene analizar la potencia consumida en los ensayos y obtener algunas relaciones. En este caso y a diferencia de las pruebas en vacío, no puede hallarse una relación directa entre la tensión y la intensidad DC dado que la medida de corriente se produjo en el cable de alimentación del inversor Bamocar, debiéndose habido efectuado aguas arriba de éste para caracterizar el bus completo visto que ahora hay dos componentes y una recirculación de potencia. A pesar de ello, sí que podemos obtener una curva potencia-intensidad que es lineal tal como esperábamos dada la naturaleza, de nuevo, de la tensión DC. A su vez, es de gran interés

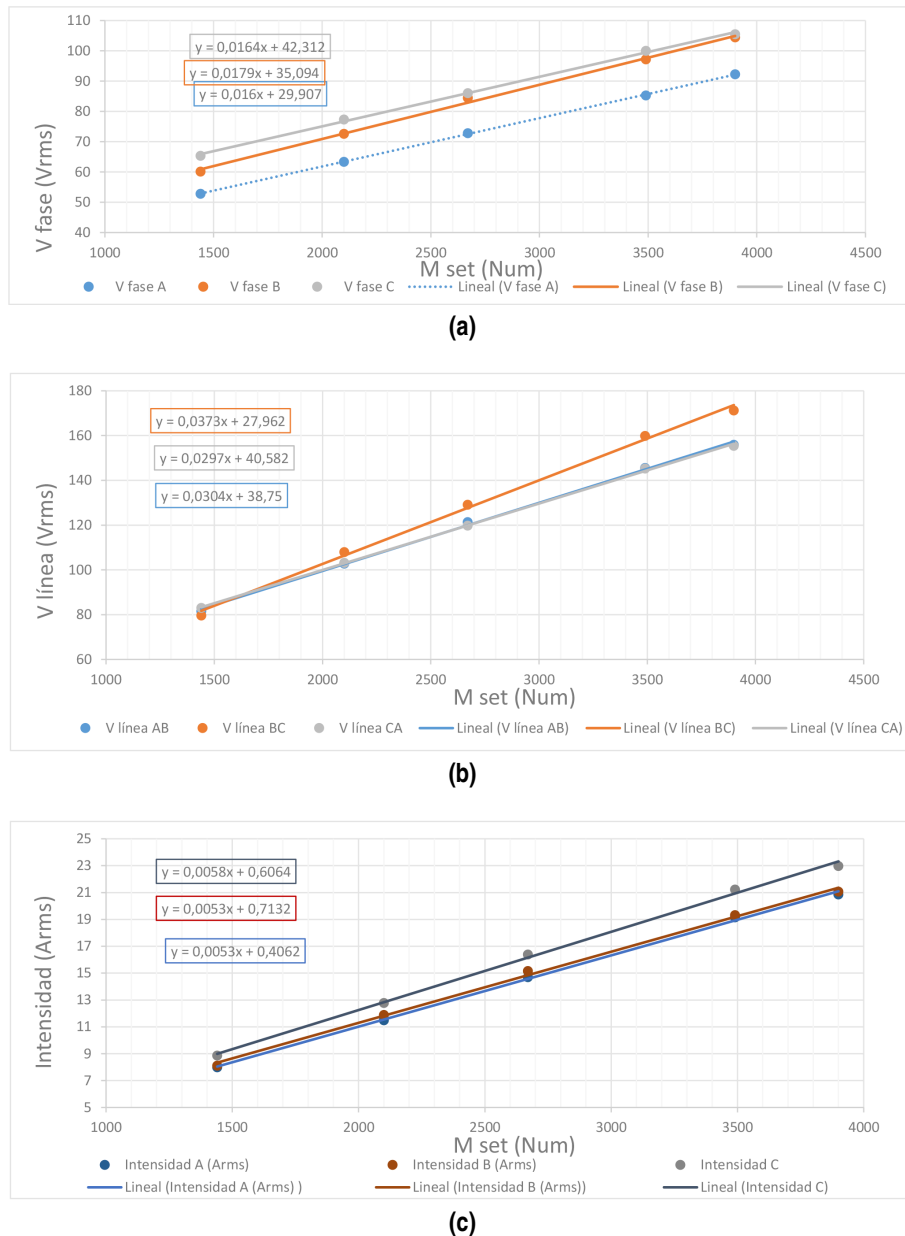


Figura 3.3 Gráficos de las principales magnitudes del ensayo Acceleration con respecto a la consigna dada.
Fuente: propia.

estudiar qué efectos producen las consignas de par no sólo en las intensidades del lado trifásico, si no también de lado de continua. Para hacernos ver estos efectos tenemos la doble figura 3.5 de donde se puede también comparar los diferentes efectos que produjeron en el bus DC los ensayos de Acceleration y freno bloqueado.

La diferencia entre ambos buses radica por un lado a que no son situaciones dinámicamente equivalentes y por ello, las necesidades energéticas del tren eléctrico serán distintas. En el Acceleration, el motor debe vencer primeramente la fuerza de inercia, que demanda una intensidad considerable en el transitorio para más tarde seguir demandando intensidad hasta que el par del motor freno iguale al consignado y todo ello ante la incipiente subida de la tensión de línea, que hace subir la potencia. En el ensayo a freno bloqueado no se desarrolla potencia mecánica útil, por lo que la velocidad es nula y las tensiones de línea serán moderadamente bajas e ídem para la potencia en el lado de continua. Por otro lado, hay que recordar que los ensayos se hicieron a frecuencias de conmutación diferentes en cuyos efectos vamos a adentrarnos inmediatamente.

Sin embargo, antes de continuar es menester abordar otra cuestión clave para la evolución de las pruebas en la bancada y es el establecimiento de límites en la consigna de par para no dañar el equipamiento. Para una mejor visualización, vamos a representar la información recolectada hasta ahora en la ecuación 3.3 que

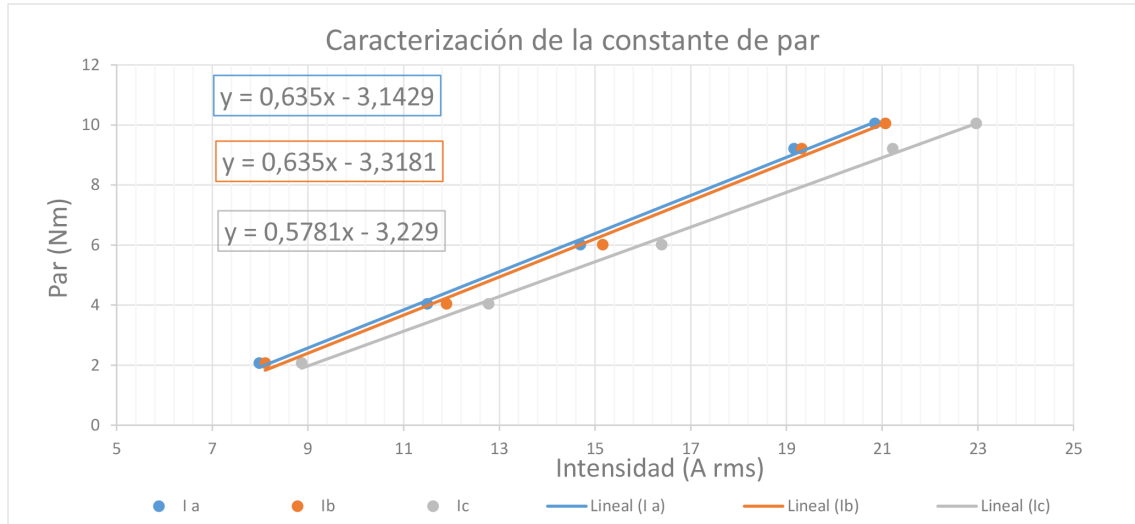
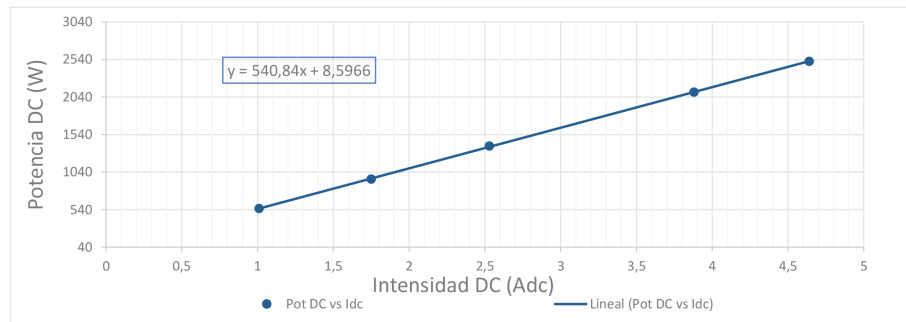
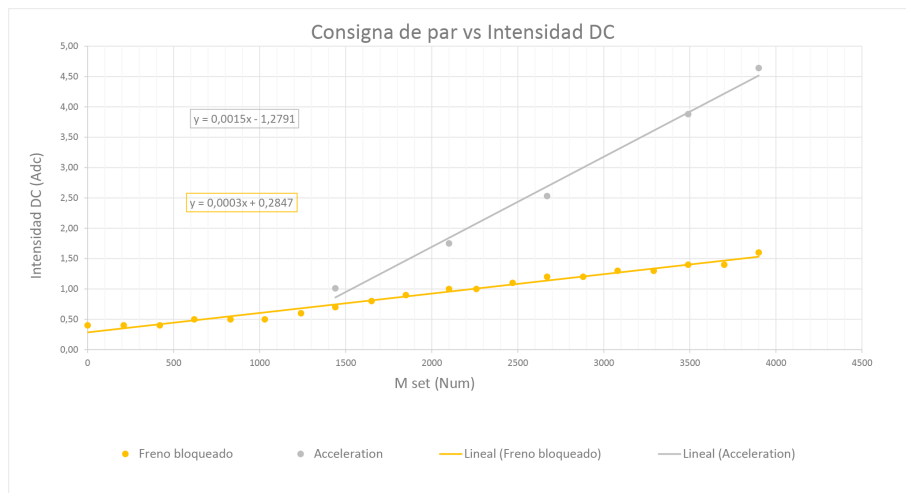


Figura 3.4 Caracterización de la curva par-intensidad del motor. Fuente: Propia.



(a)



(b)

Figura 3.5 Gráficos de las principales magnitudes del ensayo Acceleration con respecto a la consigna dada. Fuente: propia.

muestran que la consigna de par límite para un ensayo Acceleration a 12 kHz como el efectuado es de 12480 Num para no dañar los polímetros. Por la construcción del sistema eléctrico que da vida al banco, puede seleccionarse no utilizar los amperímetros si con antelación se sabe que las pruebas van a poner en riesgo estos aparatos, pero hasta ahora nunca se había tenido claro el límite en Bamocar. Mientras no crucemos esa consigna límite nos aseguraremos estar por debajo de los 20 Adc máximos que soportan los aparatos de

medida.

$$Mset = 0.0015 * I_{DC} - 1.2791(Num) \quad (3.3a)$$

3.3 Cadena de consignas en Bamocar

Un aspecto desconocido durante la mayor parte de la temporada ha sido el significado de algunos registros de la interfaz de NDrive. Esto es originado en gran medida la incomprensión de la cadena de consignas que sigue el inversor para finalmente hacer circular una intensidad por el motor, fruto de la opacidad del manual de usuario básico de Bamocar [1] y NDrive [19]. Por añadir otro a la lista de beneficios que aportó la publicación del documento FAQ [20], podemos hablar del camino que sigue las consignas de par en el inversor y cómo esto podría ayudarnos a predecir ciertos estados.

Lo primero que hay que comprender es de dónde proviene la consigna de par M set introducida. Para esto, lo primero que es necesario saber es el par que se desea vencer en Nm tal como haría inconscientemente el piloto al pulsar el pedal de aceleración. Una vez conocido, habríamos de entrar en una curva que relacione el par con una intensidad y aquí puede llegar la discordia. El fabricante EMRAX proporciona la curva Figura 1.17-(b) para el modelo 228 HV, explicando lo que habría que hacer para hallarla para el modelo de media tensión, sin embargo, no especifica la naturaleza de la intensidad en el eje de abscisas y no es cuestión menor. Queda por tanto pendiente intentar descubrir si los amperios son rms o de pico. Por otro lado, también se dispone de la constante de par que anteriormente hemos verificado que difiere con la que indica EMRAX en su hoja de características y, puede resultar sorprendente, pero ambas informaciones no dan lugar a la misma curva. Efectivamente, la pendiente en una y otro parámetro son distintas así que, ¿cuál creer? El autor se declina por adoptar como verídica la constante k_T precisamente por haber sido ya confirmada, obteniendo por tanto la relación con el par deseado en amperios rms.

Ahora que conocemos la intensidad deseada en amperios el FAQ establece las ecuaciones 3.4 para poder obtener la consigna de par M set. Si nos fijamos bien, lo único que se hace es comparar con la intensidad máxima permitida y hacer una conversión a binario, pero aquí reside el quid de la cuestión, y es que dicha intensidad a comparar es la máxima **de pico** dado que el máximo par que se puede desarrollar está relacionado con dicha magnitud. Por ello, si nuestra intensidad deseada viene dada en amperios rms, habremos de utilizar la primera expresión para pasarla a pico y comparar, mientras que si ya viene expresada en amperios pico, usaremos la segunda expresión.

$$Mset = \frac{32767 \cdot \sqrt{2}}{I_{max}^{pk}} \cdot I_{des}(Num) \quad (3.4a)$$

$$Mset = \frac{32767}{I_{max}^{pk}} \cdot I_{des}(Num) \quad (3.4b)$$

$$(3.4c)$$

Finalmente, ahora que ya conocemos la consigna de par M set, Bamocar la convierte a consigna de intensidad bajo la variable apodada $Icmd(0x26)$ mediante unas relaciones que deducimos, no diferirán mucho de las usadas para nuestro modelo 1.2 y vienen dadas por las relación 3.5. Si se quiere dar un paso más y obtener esa intensidad en amperios rms ha de usarse la ecuación 3.6. Resulta ser que esta variable es equivalente a la suma cuadrática de la intensidad en cuadratura y directa, variables de control del bucle de corriente. Como podrá pensar el lector, poseer información acerca de las variables internas del inversor resulta muy beneficioso para conocer si los cambios provocados en nuestra configuración afectan de manera positiva o negativa a nuestro seguimiento de corriente. Resulta obvio, que si no estamos efectuando debilitamineto de campo, la intensidad directa será nula y por ello $Icmd$ expresada en amperios rms es equivalente a la intensidad en cuadratura I_q .

$$Icmd(0x26) = \frac{1070 \cdot 1.5}{2 \cdot 32767} \cdot Mset \approx 0.02449 \cdot Mset(Num) \quad (3.5a)$$

$$I_{cmd}(Arms) = \frac{2000 \cdot 2}{1070 \cdot 10} \cdot M_{set}(Arms) \quad (3.6a)$$

Para comprobar la veracidad de estas conversiones, en los diferentes ensayos se tomó nota visualmente del valor de la variable *Iq actual filt*, que muestra el valor de la intensidad de cuadratura libre de ruidos, y se comparó con la consigna de par del momento, obteniendo la gráfica 3.6, cuya pendiente es aproximadamente coincidente, verificando tanto que la información descrita en el FAQ es correcta, como que la medida de la variable *Iq actual filt* tiene la estabilidad necesaria para obtener unos buenos resultados. Esto es importante para futuras ocasiones donde se pretenda leer del bus CAN ciertos registros.

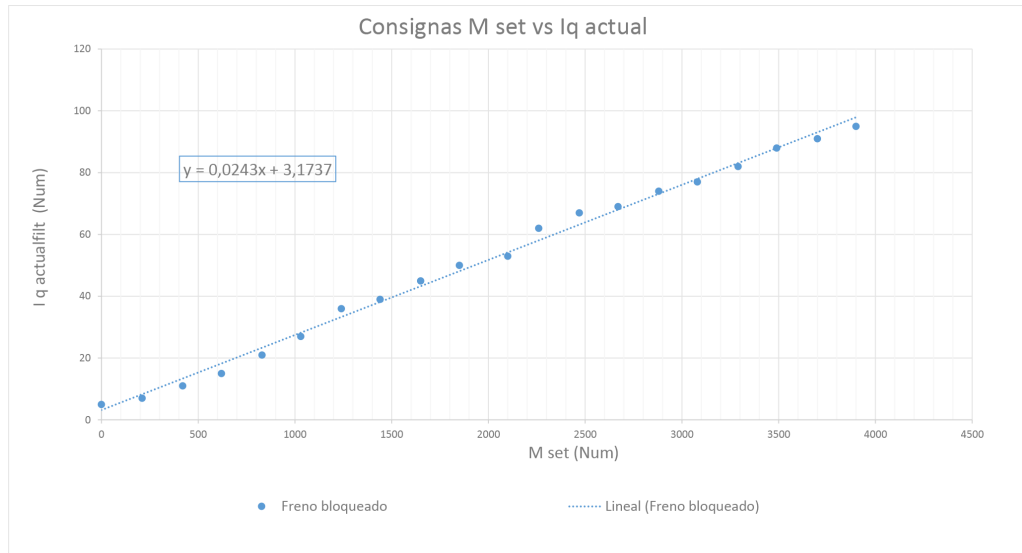


Figura 3.6 Caracterización de la curva par-intensidad del motor. Fuente: Propia.

Antes de pasar a otro punto, tal vez resulte curioso hacer una última reflexión. Si el lector lo recuerda, antes dejamos en entredicho la naturaleza de los amperios en la curva Par-intensidad del fabricante EMRAX. Bien, puede ser que tengamos alguna respuesta.

Para comprender el siguiente gráfico, es conveniente conocer que la pendiente de la curva Par-intensidad Figura 1.17-(b) es 0.7333 Nm/A (no sabemos aún si pico o rms). En la hoja de características [6], se indica que para el modelo MV se necesitará una corriente 1.52 veces superior para un mismo par comparado con el motor HV, lo que significa que, para nosotros, la pendiente de la curva quedaría en $\approx 0.4822 \text{ Nm/A}$. Resulta más que sorprendente representar la *Iq actual* anterior, calculada como función de la consigna de par *M set* y obtener el gráfico 3.7, ¡cuya pendiente coincide aproximadamente con la anterior constante! Y es que tiene lógica.

La explicación reside en que EMRAX nos muestra dos caras de la misma moneda y tengamos presentes que EMRAX es un socio preferente de Unitek. Por un lado, en ensayos en bancos dinamométricos, halla la constante de par k_T y, por otro nos representa una curva Par-intensidad que, casualmente, coincide con la obtenida con el inversor con el que se accionan la inmensa mayoría de sus motores vendidos. Resulta ahora creíble que no coincidan las dos informaciones, ya que su fuente son bien distintas, pero al menos hemos conseguido sacar algo en claro: la intensidad de la gráfica de EMRAX viene dada en amperios rms.

3.4 Frecuencias de conmutación. Consigna en rotación

Los problemas con el motor freno marcaban en muchas ocasiones el transcurso de los ensayos, incluso de la planificación semanal si no llegaban a solucionarse. Es por ello que uno de los parámetros explorados para intentar solventar el embalamiento del conjunto fue la frecuencia de conmutación de Bamocar. En efecto, se comprobó empíricamente que, ante un acceleration como los descritos anteriormente con el inversor conmutando a 8 kHz, el motor freno revertiría el sentido esperado del movimiento y se desconectaría por sobrevelocidad. Este hecho dejaba de ocurrir cuando se seleccionaba como frecuencia los 12 kHz que

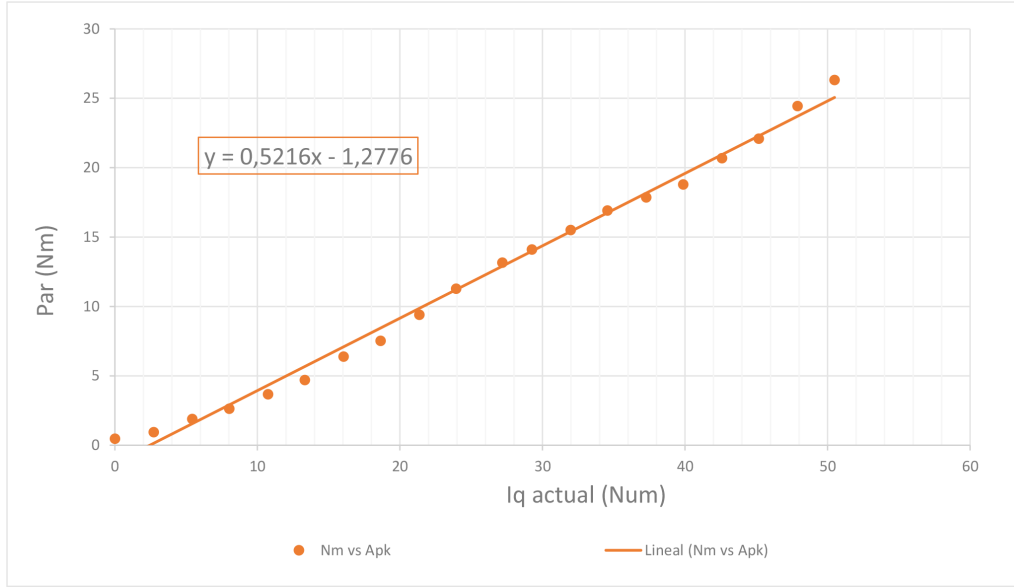


Figura 3.7 Caracterización de la curva par-intensidad del motor mediante medidas de señales de control. Fuente: Propia.

Bamocar permite, al igual que cuando se configuraba en 16 kHz. La explicación puede encontrarse en lo que significan estas frecuencias de conmutación.

Dichos parámetros afectan, en teoría, únicamente a la capacidad de actuación del control del inversor ante un cambio en la consigna. Cuanto mayor sea la frecuencia de disparo de los drivers, menos tiempo de subida experimentará el seguimiento de la consigna. Si pensamos en nuestra situación y en ciclos de reloj, cuando ambas máquinas están listas para ser accionadas y el EMRAX recibe una consigna de par en el primer ciclo, el control PI actuará proponiendo una intensidad que provocará un movimiento del eje. En el segundo ciclo de reloj se evalúa el error cometido por la intensidad real con respecto a la consigna y se rectifica. Supongamos, que por un casual en el primer ciclo se ha generado una intensidad que puede hacer desarrollar un par menor al que el motor freno está oponiendo por motivo del cambio de velocidad en el eje; en el segundo ciclo la cosa no hará más que empeorar pues el freno opondrá un par mayor y el EMRAX aún está intentando alcanzar la consigna. Si recordamos, el programa que corre en el BLS-192 tiene implementada una derivada discreta, basada en la diferencia de velocidades de un ciclo a otro. Pues bien, si en dicho primer ciclo el par motor es menor al del freno, la balanza de quién domina el movimiento empieza a declinar a favor del motor freno. Si seguimos con esta lógica, se puede constatar que el EMRAX funcionando a frecuencias de disparo bajas, es incapaz de hacer frente a un seguimiento de consigna brusco. Sin embargo, si le dotamos de un control de corrientes rápido, podrá adaptarse y contraponerse a los pares gigantes iniciales del motor freno. Es así como afecta la frecuencia de conmutación a la actuación del EMRAX. Lógicamente un mejor control tiene un precio caro a pagar y es que cuanto mayor es la frecuencia de disparo, mayores son las pérdidas por conducción y conmutación, siendo tal el efecto que como apuntan Sarigiannidis y Kladas [15] en su completo estudio sobre los efectos de la conmutación en los motores PMSM, las pérdidas por conducción pueden incrementarse casi al cuadrado con la frecuencia de conmutación. La subida puede ser tan dramática como la mostrada en 3.8.

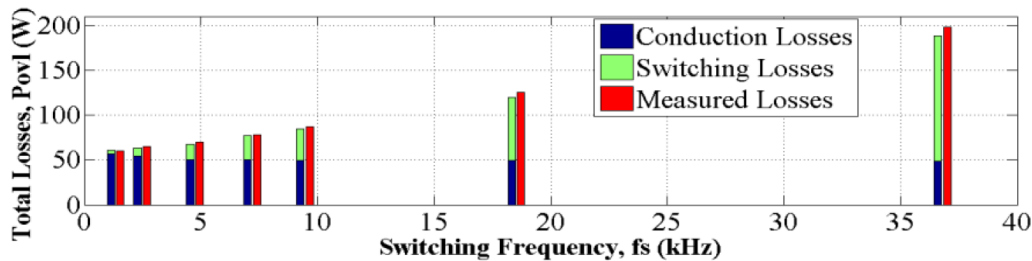


Figura 3.8 Pérdidas asociadas al aumento de la frecuencia de conmutación . Fuente: [15].

Sería conveniente por tanto, hacer algunas mediciones y asegurarse de qué es lo que ocurre internamente en la máquina. Para ello se han realizado unos ensayos apodados de *consigna en rotación*, que siguen el siguiente protocolo:

- Protocolo de marcha

EMRAX consignado velocidad nula

Motor freno recibe consigna de par (que produzca un giro en sentido contrario al freno). La cadena adquiere tensión.

EMRAX consignado en tensión. El conjunto empieza a girar en la dirección que marca el freno.

La consigna del EMRAX se va incrementando hasta parar el conjunto y, posteriormente, se sigue aumentando hasta revertir el movimiento en el sentido del EMRAX.

- Protocolo de paro

El límite de velocidad se decrementa, haciendo que el conjunto aminore su velocidad y asegurando una velocidad límite por seguridad.

El motor freno se consigna par nulo para que rote libre.

La consigna en par del EMRAX se decrementa suavemente hasta llevarlo a un estado por debajo de las 1500 rpm.

El EMRAX es consignado par nulo para que rote libre y acabe parándose por la inercia.

Con estas pruebas se pretende comprobar la veracidad de las constantes halladas hasta el momento y cuantificar las diferencias entre los distintos modos de conmutación, a 12 y 16 kHz, al no poderse realizar a 8 kHz por el embalamiento ya comentado. Es de estos ensayos de donde aparecen los datos de las tablas 3.9 y los gráficos 3.11. Extraemos como conclusión que el movimiento se para en la misma consigna de par, $M_{set} = 500 \text{ Num}$, pero hay una banda de velocidad nula hasta que se revierte el movimiento de diferente duración para el ensayo a 12 kHz y a 16 kHz. Este hecho es llamativo pero puede que aquí se expongan claramente las consecuencias directas de cambiar a un modo de conmutación más rápido.

Por un lado ya se han comentado los beneficios en el control que aporta la frecuencia de 16 kHz, pero aquí se hacen notables las pérdidas que trae consigo este modo de disparo, provocando que se reste intensidad "efectiva" y que por ello se necesite una mayor consigna de par para revertir el movimiento en el caso de 16 kHz, con el consecuente mayor consumo de energía que se constata en la figura

Un apunte más y que respalda lo anteriormente expuesto es que la curva de par para el ensayo de 12 kHz ha sido hallada aplicando la pendiente resultante del ensayo de rotor bloqueado, la mostrada por la figura 3.1. Sin embargo, si bien se esperaba poder describir el comportamiento del ensayo a 16 kHz con esta constante, los datos parecen apuntar a que aquí la constante de la recta es cercada a los 0.004 Nm/Num , lo que indicaría que para una misma consigna se desarrolla menos par por los motivos antes explicados.

3.5 Potencia en todos los ensayos

Los resultados que siguen ya han sido discutidos con anterioridad, pero es de utilidad visualizarlos todos juntos en un mismo gráfico para darse cuenta del alcance las potencias consumidas en los ensayos en carga. Precisamente, la figura 3.5 desvela que en todos los ensayos la característica potencia-intensidad para el lado de continua es casi idéntica además de mostrar que en ningún ensayo se han llegado a superar los 3 kW, lo que se encuentra muy por debajo de los límites del tren eléctrico del ART-19e donde de nuevo, el ensayo más exigente es el Acceleration, con lo que ponemos punto y final a los ensayos en carga y dejamos al lector reflexionar sobre la potencia desarrollada en los ensayos mirando la figura siguiente.

3.6 Ajuste del control PI

Ya se discutió en anteriores secciones las posibilidades de configuración que Bamocar ofrecía mediante su software NDrive, donde en concreto se discutió sobre la posibilidad de ajustar el controlador PI del bucle de corrientes y ciertos aspectos del comportamiento ante consignas de par. En el ya mencionado trabajo del compañero G. López [12] se plantea la cuestión de cuáles serían las configuraciones óptimas para los diferentes tipos de pruebas dinámicas, dado que no será la misma actuación la que se espera del motor en un Acceleration, donde la eficiencia y el ahorro de energía nos traerá sin cuidado, que en la Endurance, donde puede interesar que el coche tenga un comportamiento menos agresivo para ahorrar batería y ser capaces de terminar la prueba.

En el mencionado trabajo se realizan una serie de simulaciones para determinar cómo afectan la modificación de los tres parámetros siguientes pues la constante proporcional se mantuvo invariable.

Tiempo (min)	N (rpm)	M_set (Num)	T motor des (Nm) cte freno bloqu
0	0	0	0
0,86956522	217	51	0
1,73913043	190	90	0
2,60869565	175	150	0
3,47826087	150	164	0
4,34782609	130	210	0,1504
5,2173913	110	250	0,4224
6,08695652	95	290	0,6944
6,95652174	80	330	0,9664
7,82608696	60	370	1,2384
8,69565217	40	420	1,5784
9,56521739	20	460	1,8504
10,4347826	0	500	2,1224
11,3043478	0	540	2,3944
12,173913	0	580	2,6664
13,0434783	0	620	2,9384
13,9130435	0	660	3,2104
14,7826087	0	700	3,4824
15,6521739	0	750	3,8224
16,5217391	0	800	4,1624
17,3913043	0	850	4,5024
18,2608696	0	890	4,7744
19,1304348	-500	910	4,9104

(a)

Tiempo (min)	N (rpm)	M_set (Num)	T motor des (Nm) cte modificada
0	0	0	0
0,83	270	51	0,204
1,67	240	90	0,36
2,50	70	370	1,48
3,33	45	420	1,68
4,17	15	460	1,84
5,00	0	500	2
5,83	0	540	2,16
6,67	0	580	2,32
7,50	0	620	2,48
8,33	0	800	3,2
9,17	0	850	3,4
10,00	0	890	3,56
10,83	0	910	3,64
11,67	0	950	3,8
12,50	0	990	3,96
13,33	0	1030	4,12
14,17	0	1070	4,28
15,00	0	1110	4,44
15,83	0	1150	4,6
16,67	0	1190	4,76
17,50	0	1240	4,96
18,33	-170	1280	5,12
19,17	-200	1320	5,28
20,00	-328	1520	6,08

(b)

Figura 3.9 Gráficos de las principales magnitudes del ensayo Acceleration con respecto a la consigna dada.
Fuente: propia.

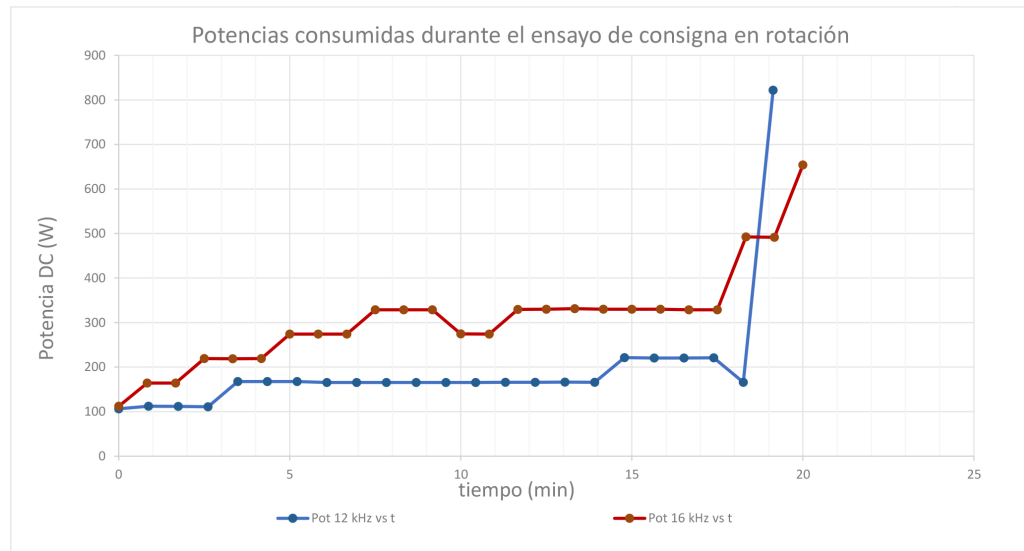
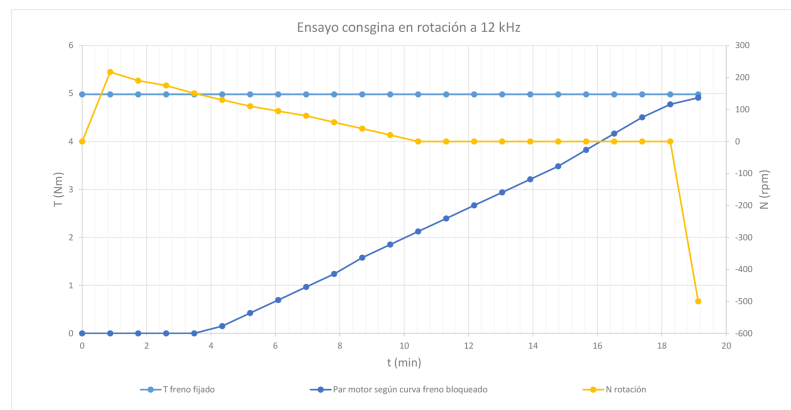
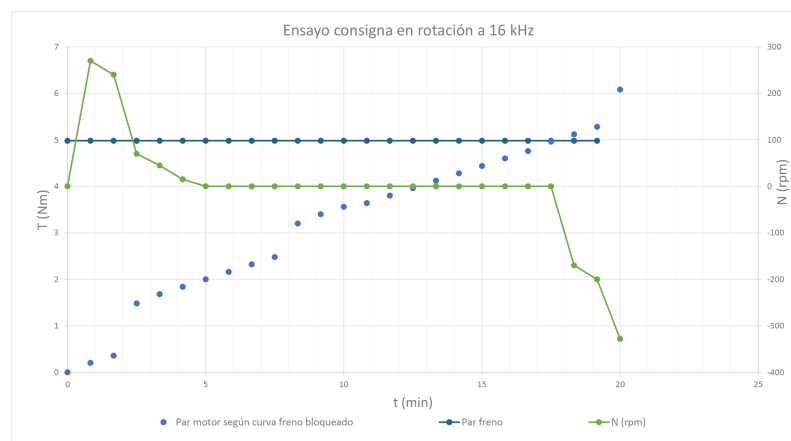


Figura 3.10 Potencias demandadas durante los dos ensayos de consigna en rotación. Fuente: propia.



(a)



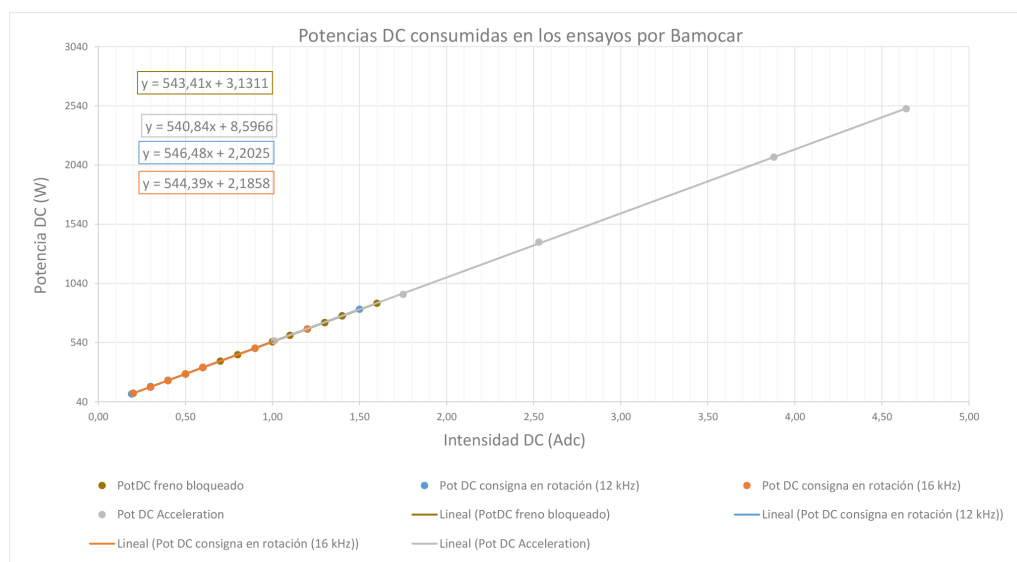
(b)

Figura 3.11 Gráficos de las principales magnitudes del ensayo Acceleration con respecto a la consigna dada. Fuente: propia.

- Tiempo integral T_i
- Rampa de subida M_{acc}

Tabla 3.4 Pérdidas asociadas al aumento de la frecuencia de conmutación . Fuente: Propia.

Freno bloqueado			Consigna en rotación										Acceleration			
Tensión DC	Intensidad DC	Potencia DC	12 kHz			16 kHz							12 kHz			
			Tiempo (min)	N (rpm)	Tensión DC	Intensidad DC	Potencia DC	Tiempo (min)	N (rpm)	Tensión DC	Intensidad DC	Potencia DC	N (rpm)	Tensión DC	Intensidad DC	Potencia DC
550	0.40	220														
550	0.4	220														
551	0.4	220.4														
551	0.5	275.5	0	0	560	0.19	106.4	0	0	560	0.2	112	470	549	1.01	554.49
551	0.5	275.5	0.863565	217	560	0.2	112	0.83	270	547	0.3	164.1	660	541	1.75	946.75
550	0.5	275	1.73913	190	558	0.2	111.6	1.67	240	548	0.3	164.4	800	549	2.53	1388.97
549	0.6	329.4	2.608696	175	555	0.2	111	2.50	70	548	0.4	219.2	985	543	3.88	2106.84
548	0.7	383.6	3.478261	150	559	0.3	167.7	3.33	45	547	0.4	218.8	1080	542	4.64	2514.88
547	0.8	437.6	4.347826	130	559	0.3	167.7	4.17	15	548	0.4	219.2				
546	0.9	491.4	5.217391	110	559	0.3	167.7	5.00	0	548	0.5	274				
546	1	546	6.086957	95	552	0.3	165.6	5.83	0	548	0.5	274				
548	1	548	6.956522	80	551	0.3	165.3	6.67	0	548	0.5	274				
546	1.1	600.6	7.826087	60	551	0.3	165.3	7.50	0	548	0.6	328.8				
546	1.2	655.2	8.695652	40	552	0.3	165.6	8.33	0	548	0.6	328.8				
545	1.2	654	9.565217	20	552	0.3	165.6	9.17	0	548	0.6	328.8				
545	1.3	708.5	10.43478	0	552	0.3	165.6	10.00	0	549	0.5	274.5				
546	1.3	709.8	11.30435	0	553	0.3	165.9	10.83	0	548	0.5	274				
547	1.4	765.8	12.17391	0	553	0.3	165.9	11.67	0	549	0.6	329.4				
546	1.4	764.4	13.04348	0	554	0.3	166.2	12.50	0	550	0.6	330				
545	1.6	872	13.91304	0	553	0.3	165.9	13.33	0	552	0.6	331.2				
			14.78261	0	553	0.4	221.2	14.17	0	550	0.6	330				
			15.65217	0	551	0.4	220.4	15.00	0	550	0.6	330				
			16.52174	0	551	0.4	220.4	15.83	0	550	0.6	330				
			17.3913	0	552	0.4	220.8	16.67	0	548	0.6	328.8				
			18.26087	0	553	0.3	165.9	17.50	0	548	0.6	328.8				
			19.13043	-500	548	1.5	822	18.33	-170	547	0.9	492.3				
								19.17	-200	546	0.9	491.4				
								20.00	-328	545	1.2	654				

Tabla 3.5 Pérdidas asociadas al aumento de la frecuencia de conmutación . Fuente: Propia.

- Rampa de bajada M_{decc}

Para confirmar que lo concluido con el modelo de simulación tenía lógica se procedió a realizar varios ensayos en la bancada y como elemento de novedad, a la lectura del bus CAN para guardar los valores de los registros de Bamocar en un fichero de texto. Esto se realizó gracias un Arduino UNO que fue configurado para realizar la tarea de leer y almacenar los datos. Posteriormente se creó el código 3.2 para tratar y representar los datos obtenidos y de su ejecución se obtuvieron las curvas que siguen. Como se puede comprobar, la idoneidad de uso de este Arduino es más que discutible pues la definición de los datos es sin duda bastante pobre y por desgracia las causas de tan mala lectura no están del todo claras. Si bien podría atribuirse a un problema de programación, también habría de ser investigada la capacidad de lectura del Arduino sin saturar. Aún con esto, los resultados permiten extraer ciertas conclusiones.

Código 3.2 Código para la carga y representación de los datos recogidos vía CAN.

```
clc,clear

%% Comparación de Ti (muestreo 50 ms)
kp=15;
```

```

%%Ti=1200;
Macc=100;
Mdecc=100;
Iq_ref=2470;

%% Carga de los datos. Modificar según el nombre y número de datos.
A=importdata('P15n.txt');
B=importdata('P16n.txt');
C=importdata('P17n.txt');
D=importdata('P18n.txt');
E=importdata('P19n.txt');
F=importdata('P20n.txt');

N_1=A.data(:,3);
T_1=length(N_1);
T_1=[0:50:T_1*50-1];

N_2=B.data(:,3);
T_2=length(N_2);
T_2=[0:50:T_2*50-1];

N_3=C.data(:,3);
T_3=length(N_3);
T_3=[0:50:T_3*50-1];

N_4=D.data(:,2);
T_4=length(N_4);
T_4=[0:50:T_4*50-1];

N_5=E.data(:,3);
T_5=length(N_5);
T_5=[0:50:T_5*50-1];

N_6=F.data(:,2);
T_6=length(N_6);
T_6=[0:50:T_6*50-1];

figure(1)
plot(T_1,-N_1,'LineWidth',0.5)
hold on
plot(T_2,-N_2,'LineWidth',0.5)
hold on
plot(T_3,-N_3,'LineWidth',0.5)
hold on
plot(T_4,-N_4,'LineWidth',0.5)
hold on
plot(T_5,-N_5,'LineWidth',0.5)
hold on
plot(T_6,-N_6,'LineWidth',0.5)
title(['kp=',num2str(kp),' M-acc=',num2str(Macc),' M-decc=',num2str(Mdecc),' M'
      set=',num2str(Iq_ref)];'Comparación de N para diferentes Ti'})
legend('Ti=7000','Ti=10000','Ti=1000','Ti=500','Ti=249','Ti=750')
xlabel('Tiempo (ms)','FontSize',12)
ylabel('Velocidad (Num)','FontSize',12)

%% Comparación de M-acc (muestreo 50 ms)
kp_1=15;

```



```

Ti_1=1000;
Mdecc_1=100;
Iq_ref=2470;

G=importdata('P17n.txt');
H=importdata('P21n.txt');
I=importdata('P22n.txt');

N_7=G.data(:,3);
T_7=length(N_7);
T_7=[0:50:T_7*50-1];

N_8=H.data(:,2);
T_8=length(N_8);
T_8=[0:50:T_8*50-1];

N_9=I.data(:,2);
T_9=length(N_9);
T_9=[0:50:T_9*50-1];

figure(2)
plot(T_7,-N_7,'LineWidth',0.5)
hold on
plot(T_8,-N_8,'LineWidth',0.5)
hold on
plot(T_9,-N_9,'LineWidth',0.5)
title(['kp=',num2str(kp_1),' Ti=',num2str(Ti_1),' M-decc=',num2str(Mdecc_1),'  
M set=',num2str(Iq_ref)];'Comparación de N para diferentes M-acc'})
legend('M-acc=1000','M-acc=10','M-acc=5')
xlabel('Tiempo (ms)','FontSize',12)
ylabel('Velocidad (Num)','FontSize',12)

%% Comparación de M-acc con escalón más fuerte (muestreo 50 ms)
kp_2=15;
Ti_2=1000;
Mdecc_2=100;
Iq_ref_2=3700;

J=importdata('P23n.txt');
K=importdata('P24n.txt');

N_10=J.data(:,3);
T_10=length(N_10);
T_10=[0:50:T_10*50-1];

N_11=K.data(:,2);
T_11=length(N_11);
T_11=[0:50:T_11*50-1];

figure(3)
plot(T_10,-N_10,'LineWidth',0.5)
hold on
plot(T_11,-N_11,'LineWidth',0.5)
title(['kp=',num2str(kp_2),' Ti=',num2str(Ti_2),' M-decc=',num2str(Mdecc_2),'  
M set=',num2str(Iq_ref_2)];'Comparación de N para diferentes M-acc'})
legend('M-acc=10','M-acc=5')
xlabel('Tiempo (ms)','FontSize',12)

```

```

ylabel('Velocidad (Num)','FontSize',12)

%% Comparación de M-acc (muestreo 20 ms)
kp_3=15;
Ti_3=1000;
Iq_ref_3=3700;

L=importdata('P29n.txt');
M=importdata('P30n.txt');
O=importdata('P31n.txt');

N_12=L(:,2);
T_12=length(N_12);
T_12=[0:20:T_12*20-1];

N_13=M(:,2);
T_13=length(N_13);
T_13=[0:20:T_13*20-1];

N_14=O(:,3);
T_14=length(N_14);
T_14=[0:20:T_14*20-1];

figure(4)
plot(T_12,-N_12,'LineWidth',0.5)
hold on
plot(T_13,-N_13,'LineWidth',0.5)
hold on
plot(T_14,-N_14,'LineWidth',0.5)
title(['kp=',num2str(kp_3),' Ti=',num2str(Ti_3),' M set=',num2str(Iq_ref_3)];'
      Comparación de N para diferentes M-acc(M-acc=M-decc)'])
legend('M-acc=10','M-acc=100','M-acc=1000')
xlabel('Tiempo (ms)','FontSize',12)
ylabel('Velocidad (Num)','FontSize',12)

%% Comparación de M-decc (muestreo 50 ms). La aceleración debería salir igual

kp_4=15;
Ti_4=1000;
Macc_4=10;
Iq_ref_4=2470;

P=importdata('P25n.txt');
Q=importdata('P26n.txt');
R=importdata('P27n.txt');

N_15=P.data(:,2);
T_15=length(N_15);
T_15=[0:50:T_15*50-1];
N_16=Q(:,2);
T_16=length(N_16);
T_16=[0:50:T_16*50-1];
N_17=R(:,3);
T_17=length(N_17);
T_17=[0:50:T_17*50-1];

figure(5)

```

```

plot(T_15,-N_15,'LineWidth',0.5)
hold on
plot(T_16,-N_16,'LineWidth',0.5)
hold on
plot(T_17,-N_17,'LineWidth',0.5)
title(['kp=',num2str(kp_4),' Ti=',num2str(Ti_4),'M-acc=',num2str(Macc_4),' M
      set=',num2str(Iq_ref_3)];'Comparación de N para diferentes M-decc'))
legend('M-acc=1000','M-acc=3000','M-acc=4000')
xlabel('Tiempo (ms)','FontSize',12)
ylabel('Velocidad (Num)','FontSize',12)

```

- El primer resultado claro es que el tiempo integral afecta al tiempo de subida a expensas de poder generar sobreoscilación, como es bien conocido de teoría de control. Así lo muestra la figura 3.12 donde se ve que al seleccionar los T_i 750 y 249 μs se alcanza antes el régimen permanente. Debido a la definición de la lectura es complicado juzgar la magnitud de las sobreoscilaciones, puesto que tampoco parecen ser significativas. Siendo conservadores sin embargo, seleccionaremos para los futuros tests un tiempo integral de 1000 μs .

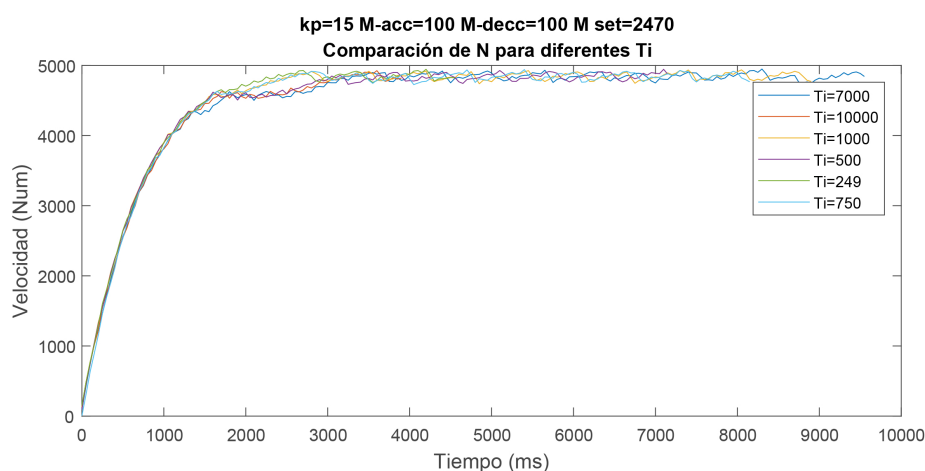


Figura 3.12 Test de aceleración variando el tiempo integral. Fuente: propia.

- La rampa de subida tiene efecto sobre el seguimiento de la consigna, pero el efecto parece ser casi imperceptible. De la gráfica 3.13 se comprueba una leve mejoría cuando la rampa tiene un valor más bajo (azul), como vimos en la figura 1.22 del capítulo introductorio, ya que alcanza antes la consigna y para un valor mayor (amarillo) la velocidad parece no haberse encauzado aún en una banda definida. En todo caso, comprobamos que de momento, parece no ser un parámetro determinante y habría que ver su actuación cuando las consignas de par fueran mayores.
- La rampa de bajada sí parece tener un efecto más directo en el seguimiento de consigna. Esta vez la lectura se tomó en el momento de consignar un par menor al motor cuando se provenía de un cierto régimen de velocidad y seguidamente se consigna par nulo. Los resultados de la figura 3.14 se aprecia como el menor de los tiempos ($T_i = 1000 \mu s$ en azul) produce la llegada tanto al régimen intermedio de velocidad como al reposo mucho más rápido que cuando seleccionamos el tiempo máximo de $T_i = 4000 \mu s$ (amarillo) μs .

Como se ha podido comprobar, de la lectura del bus CAN han podido sacarse muchas conclusiones y observarse fenómenos que no son para nada apreciables a simple vista. A la vista de las gráficas se comprueba que mientras que el tiempo integral sí parece jugar su rol adecuadamente y como esperado, sólo la rampa de bajada obedece a lo predicho por el manual. Habría que mencionar que Unitek lanzó recientemente un nuevo firmware donde se habla de la posibilidad de poder definir y configurar de forma más efectiva las rampas

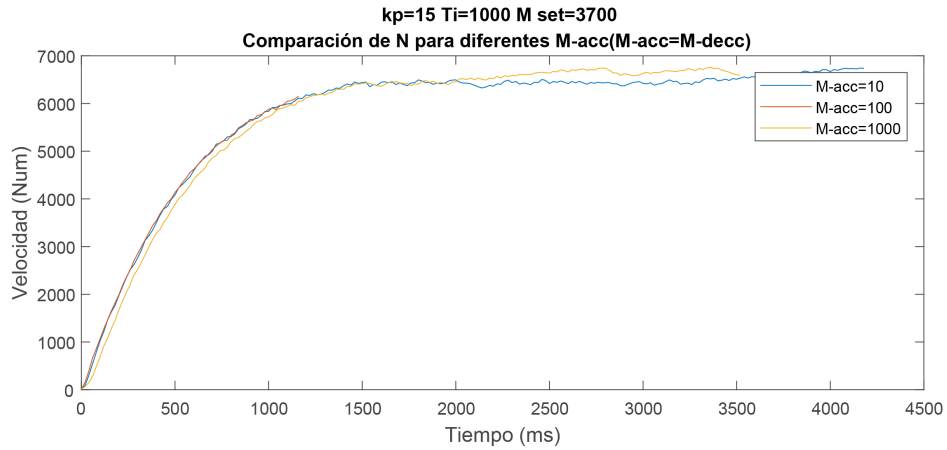


Figura 3.13 Potencias demandadas durante los dos ensayos de consigna en rotación. Fuente: propia.

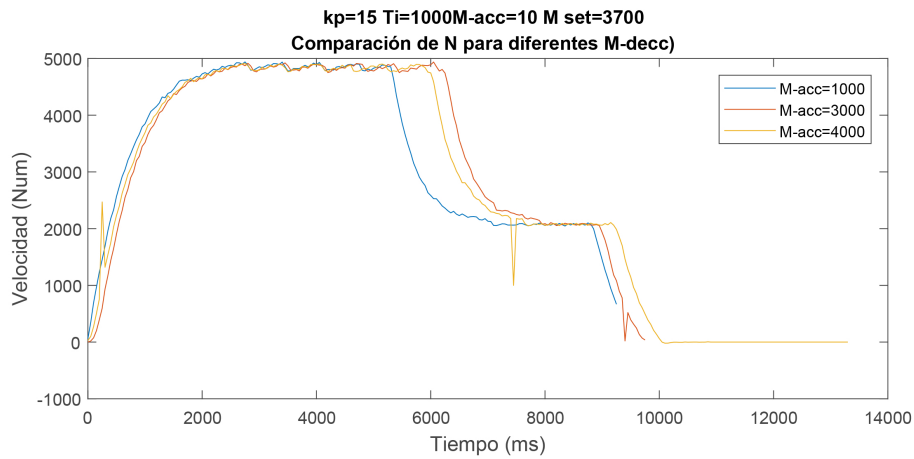


Figura 3.14 Potencias demandadas durante los dos ensayos de consigna en rotación. Fuente: propia.

de subida y bajada pues, como se explica ahí, con la versión firmware que nuestra Bamocar tenía instalada en el momento de las pruebas, sólo podía definirse una de las rampas. Esto explicaría por qué la rampa de aceleración parece no tener ningún efecto mientras que la de deceleración sí.

Se ha de decir que este método de captura no está para nada depurado, como está claro, ya que fue un montaje improvisado en un intento de monitorizar las señales de control enviadas via CAN en el laboratorio, pues en el ART-19e existe un sistema encargado explícitamente de la lectura y almacenamiento de las tramas CAN: la *Safety Control Unit (SCU)* desarrollada por el compañero Carlos Castillo [3]. Queda por tanto, como tarea pendiente para la próxima temporada, la correcta implementación y testeo de dicho sistema de lectura en la bancada.

4 Conclusiones y líneas futuras

Estamos ya en disposición de echar la vista hacia atrás ahora que todo se han expuesto todos los resultados técnicos y se puede juzgar la bondad del trabajo y el cumplimiento de los objetivos propuestos a su inicio. De igual forma que se mira al pasado para reconocer los errores, toca mirar a futuro y proponer una lista de mejoras y algunas tareas a completar para sacar más partido de la bancada e incluso mejorarla.

4.1 Conclusiones

La realización de multitud de pruebas y la adquisición de información para su procesado y análisis es indiscutible, a la vista están los cuatro apéndices de este trabajo: Apéndice A, Apéndice B, Apéndice C y Apéndice D. Otros tantos gráficos obtenidos mediante Excel han servido para determinar que el motor sufre ligeras variaciones con respecto a lo que reza su hoja de características o presenta distintos comportamientos dependiendo de la configuración del inversor. En concreto, podemos definir tres grandes resultados:

- La característica tensión-velocidad $k_v = 0.0478V_{rms}/rpm$ parece no estar bien definida en la hoja de características. Tras los ensayos, los resultados medidos que encajan con la teórica son aquellos donde se representa la **tensión de fase** frente a la velocidad y no la de línea. Adicionalmente, se tienen indicios por otros documentos oficiales de la marca fabricante del inversor, Unitek, que la magnitud es de fase y no de línea, como se aprecia en el extrado del documento [20] de la figura 2.13.
- La característica par-intensidad $k_T = 0.75Nm/Arms$ no es directamente aplicable. Se ha demostrado mediante las medidas tomadas que la constante propuesta por EMRAX es demasiado optimista, correspondiendo la constante de par real a, aproximadamente, 0.63 Nm/Arms. Este resultado concuerda si tenemos en cuenta los cálculos realizados por la universidad de Darmstadt para el modelo de motor de tensión superior y los extrapolamos al nuestro como muestran las relaciones 3.4
- Se ha comprobado el efecto de la variación de los parámetros del control PI del inversor. Los resultados mostrados en la sección 3.6 permiten verificar los efectos de la variación del tiempo integral y las rampas de aceleración y deceleración y podrá utilizarse como feedback para una mejor construcción del modelo en Simulink. Si bien es cierto que los efectos son los esperados, no suponen una mejoría abismal, al menos por lo mostrado en el entorno de laboratorio, por lo que no serán parámetros prioritarios a cambiar cuando el monoplaza realice tests en un futuro próximo.
- Se han explicado exhaustivamente los principales parámetros del software NDrive con el que se controla el inversor Bamocar. Muchos de estos registros eran completos desconocidos o sólo se tenía una idea parcial y vaga a cerca de su configuración. A lo largo del capítulo 1.4.3 se detallan los menús más importantes del inversor y también cómo realizar algunas operaciones básicas y qué modificar en primera instancia ante ciertos problemas.
- A lo largo del trabajo se ha podido comprobar los puntos de operación bajo los que el tren de potencia ha sido probado y se ha descrito el comportamiento del conjunto durante los mismos. Esto establece un "punto de guardado", sabiendo desde ahora en adelante lo que ocurre en estas situaciones y cuán seguras son. Se espera que esto sirva para adentrarse en puntos de operación mas exigentes y que traigan soluciones más concluyentes bajo carga.

Como se ha podido comprobar, en general se han cumplido muchos de los objetivos propuestos desde el principio del documento, si bien el modo en los que se han deducido puede ser cuestionado. La bondad y veracidad de un resultado experimental en un ambiente de laboratorio debe estar siempre listo para la críticas pues hay muchos factores propios de la experimentación real que pueden hacer dudar de él. Bajo el sincero punto de vista del autor, muchos de los resultados obtenidos podrían haber sido de muchísima más calidad y esto habría traído consigo una mayor densidad de datos que avalarían sin duda la veracidad de las conclusiones. El correcto manejo del osciloscopio, así como el tener claro qué magnitudes medir preferentemente para tener a posteriori datos concluyentes es todo un arte que ha de aprenderse y, en todo proceso existe una curva de aprendizaje que un servidor junto con su equipo han debido de superar en un tiempo honestamente reducido, al deber atender otras tareas dentro de ARUS (por no hablar de satisfacer una vida académica exigente dentro de la escuela). Esto hizo que como es lógico los últimos ensayos fuesen los más metódicos y de los que mejores resultados pueden extraerse.

Otros de los grandes puntos que sólo se mencionó de pasado fue el constante fallo en el manejo del motor freno, el dinamómetro de la bancada. Este hecho entorpeció enormemente el final del periodo de pruebas en bancada, pues por muchas soluciones que se propusiesen ninguna parecía satisfacer a la máquina, funcionando aleatoriamente en función de una causa aún desconocida.

En lo personal, el autor se encuentra satisfecho por el trabajo realizado, pues todo el análisis debió de efectuarse en un tiempo récord para que los resultados pudiesen ser expuestos en la competición alemana. También se han explorado muchos aspectos, no necesariamente técnicos de procedimentación y operación en el sistema de alta tensión que ha hecho aumentar el know-how de los miembros del equipo en tareas tan importantes como las operaciones bajo tensión. Por su parte, este trabajo recoge muchos resultados que de no haber sido expuestos aquí se perderían en alguna carpeta del ordenador de algún miembro, por lo que su mera aparición en el texto lo dotan de una especial importancia para la transmisión de conocimiento a futuros estudiantes, miembros y miembras de ARUS.

En general se puede decir que los resultados extraídos de las pruebas al tren eléctrico de potencia, si bien se realizaron a una escala de potencia muy inferior a los límites de funcionamiento de los componentes, son extrapolables y servirán para predecir el comportamiento del sistema en conjunción con un modelo de simulación.

4.2 Líneas futuras

Como punto y final se pretende presentar una serie de puntos que a juicio del autor conviene tener presentes en el inicio de la nueva temporada y que suponen también una crítica al trabajo realizado ya sea porque podrían haberse ejecutado mejor o porque no se han podido realizar por ser imposible.

4.2.1 Monitorización del bus CAN e inclusión de más sistemas del ART en la bancada

Debido a que el sistema SCU no estuvo operativo hasta finales de la presente temporada y a que su configuración y utilización sobrepasaban los conocimientos de electrónica del autor, no pudo implementarse para trabajar en la bancada de pruebas con la suficiente antelación. Esto resultó en su sustitución por un Arduino UNO que provocó los resultados ya vistos en la sección 3.6, que sorprenden por su poca definición y falta de precisión. La capacidad de procesamiento de SCU es intrínsecamente mejor debido a su arquitectura basada en un microprocesador más potente además de tener capacidad para almacenar datos en una memoria SD. Siendo concebida específicamente para realizar tareas de monitorización, sería un gran desperdicio de recursos no incluir este sistema diseñado por miembros del equipo entre los dispositivos de uso diario de las pruebas del tren eléctrico.

El beneficio sería mutuo para los departamentos de E-Powertrain y Electrónica, pues por un lado ayudaría a recabar más información acerca del comportamiento de las variables internas de Bamocar y ampliaría aún más el conocimiento del inversor (quién sabe cuándo puede plantearse el diseño de un inversor propio) y al mismo tiempo, al ser un sistema de complejidad considerable, ayudaría a los miembros del departamento de electrónica a poner en marcha el sistema con mucha más antelación al ritmo típico de desarrollo típico, pudiendo depurarlo en un ambiente de laboratorio.

Es en el anterior punto donde radica un hecho que debe ser tomado muy en serio si estos dos departamentos, el brazo electrificado de ARUS, aspiran a dejar de ser el cuello de botella para el desarrollo del vehículo. A medida que los sistemas electrónico alcanzan madurez, llegando incluso a no necesitar ser modificados de una temporada a otra, empieza a poderse considerar incluirlos en la aparamenta de bancada para que puedan empezar a ser depurados con mucha antelación y su montaje en el vehículo se haga mucho más rápido.

Hablamos del *TSAL*, que es la barra de leds que debe tornarse roja cuando la tensión del sistema tractor esté presente en el vehículo y que necesita esperar a ser comprobado, por tanto, cuando la batería del ART está finalizada y lista para ser usada. Se piensa también en la *VCU*, sistema que lee la señal del sensor en el pedal de aceleración y envía una consigna de par a la Bamocar, que es un sistema maduro con el que se podría empezar a plantear la simulación de perfiles par correspondientes a circuitos reales que, por ejemplo, el departamento de Vehicle Dynamics de ARUS podría proporcionar. De ese modo, y si se solventan los problemas con el motor freno, la bancada podría dar un salto de calidad y acercarse más a las condiciones que se encontrará el sistema tractor en pista.

Otro punto flaco del trabajo realizado ha sido la dificultad de cuantificar la potencia consumida por los equipos y a almacenarla en ficheros. Esto ha sido debido principalmente por tener aparatos de medida limitados y al gran ruido que se genera en el lado trifásico, verificable en todas las gráficas de los apéndices. La posibilidad de adquirir el mismo aparato que se coloca en las competiciones debería ser planteada por el equipo. Este aparato mostrado en la figura se llama *Energy Meter* y toma tanto la tensión como la intensidad del bus DC, donde no hay apenas ruido, y los almacena para su posterior recogida vía Ethernet. Este dispositivo es clave para trabajar conjuntamente con SCU, por no hablar de que tener medidas precisas acerca de la energía consumida puede ayudar a no sobrepasar las restricción de los 80kW pico en potencia que impone la normativa.



Figura 4.1 Energy meter proporcionado en FSG como dispositivo para monitorización y recogida de datos del tren de potencia. Fuente: Documentación de FSG.

En definitiva, la bancada de pruebas podría ser un sistema cada vez más parecido los ART eléctricos donde poder probar muchos sistemas antes de montarlos en el coche. Pero para ello no sólo han de actuar los demás departamentos.

4.2.2 Escalado en potencia y circulación bidireccional

En efecto, uno de los mayores problemas, si no el que más, es la imposibilidad de la bancada debido a su construcción de reinyectar potencia en la red. Ya se habló de las consecuencias que esto tenía en la manera de operar el banco de ensayos y las precauciones extras que debían tomarse y que han condicionado muchos de los test efectuados, simplemente por miedo a no saber si tras una consigna más brusca de lo esperado el sistema resultaría dañado.

Es debido a esto que la potencia consumida en los ensayos a penas superó los 3kW, como ya se mostró en la figura 3.5. Es normal hasta cierto punto tener bancos de pruebas escalables y mirando con perspectiva la trayectoria del equipo, en tan sólo dos años se dispone de una bancada a la que hasta día de hoy se le ha podido sacar partido. Sin embargo si hay una dirección clara hacia la que hay que avanzar es la ya señalada anteriormente: la bancada debe parecerse lo más posible al ART. Para ello, falta una parte fundamental que

es la batería de continua y poder simular frenadas de potencia considerable (y la reinyección de potencia asociada).

Es por lo mismo que, a principios de temporada, el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la ETSI acordó con el equipo ARUS ceder los materiales necesarios para la construcción de un convertidor de potencia bidireccional de diseño propio. Con esto se iniciaron las operaciones necesarias para comenzar la construcción de dicho dispositivo pues debía de elaborarse una lista de materiales para fueran comprados y montados. La llegada de los materiales se dilató en el tiempo por varios motivos, y el montaje lógicamente también; no obstante consiguió realizarse casi en su totalidad a finales de julio. No se puede decir lo mismo del sistema de control y maniobra asociado al convertidor y que deja de ser manual para pasar a ser gobernado por un autómatas industrial de la gama Modicon de Schneider Electric para un aumento de la seguridad de las personas que manejan la bancada. Es la comunicación de este autómatas lo que supuso un escalón en la finalización del la puesta en marcha del aparato hasta el día de hoy y que necesita de la atención dedicada de los miembros del departamento de E-Powertrain.



Figura 4.2 Convertidor de potencia bidireccional que ha sido construido en paralelo esta temporada en las instalaciones del Depto. de Ingeniería Eléctrica.

Como podrá imaginarse el lector, acometer la construcción de tal dispositivo además de llevar a cabo las tareas descritas en este trabajo y otras muchas más asociadas a la construcción del cableado y otros sistemas del ART-19e sobrepasaron la capacidad de trabajo del equipo humano disponible en el momento. Sin embargo, no hay motivo para que en la entrante temporada el trabajo se reorganice de tal manera que pueda finalizarse la puesta en marcha del convertidor bidireccional, concluyendo un salto de calidad abismal en la configuración de la bancada.

Una de las ventajas inmediatas es la recirculación de potencia a la red, pero otros puntos clave del dispositivo es la posibilidad de escoger el nivel de tensión del bus DC con lo que se podrían simular distintos niveles correspondientes a varios diseños de acumuladores además de permitir una mejor inclusión de todos los sistemas electrónicos. Además de abrir la puerta al diseño de la implementación de la frenada regenerativa en un futuro ART.

Como se ha dicho, este dispositivo está montado casi en su totalidad, quedando únicamente un gran tiempo de desarrollo para conseguir comunicar vía ModBUS con el autómata, siempre con la ayuda desinteresada del personal del laboratorio. De realizarse ARUS se convertiría en equipo español con la mejor bancada de pruebas. Merece la pena ponerse manos a la obra.

Apéndice A

Gráficas del ensayo en vacío del 26 de marzo

Se presentan aquí todas las gráficas de la forma de onda de tensión de línea AB e intensidad de fase A tras ser computadas en MATLAB®.

A.1 Tensión de línea AB

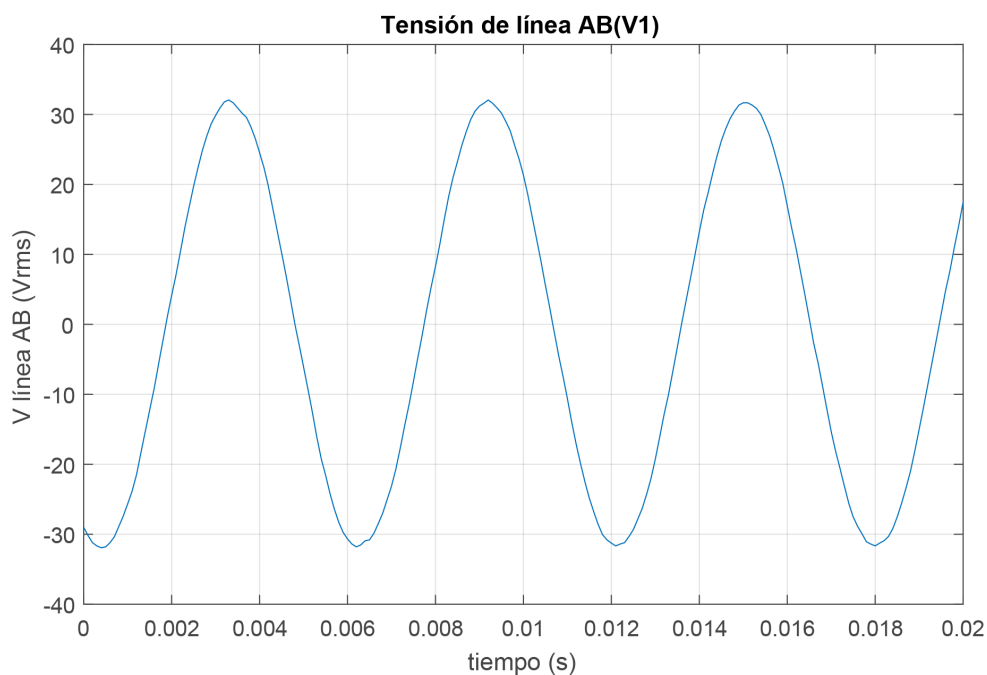


Figura A.1 Tensión de línea AB prueba V1. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia.

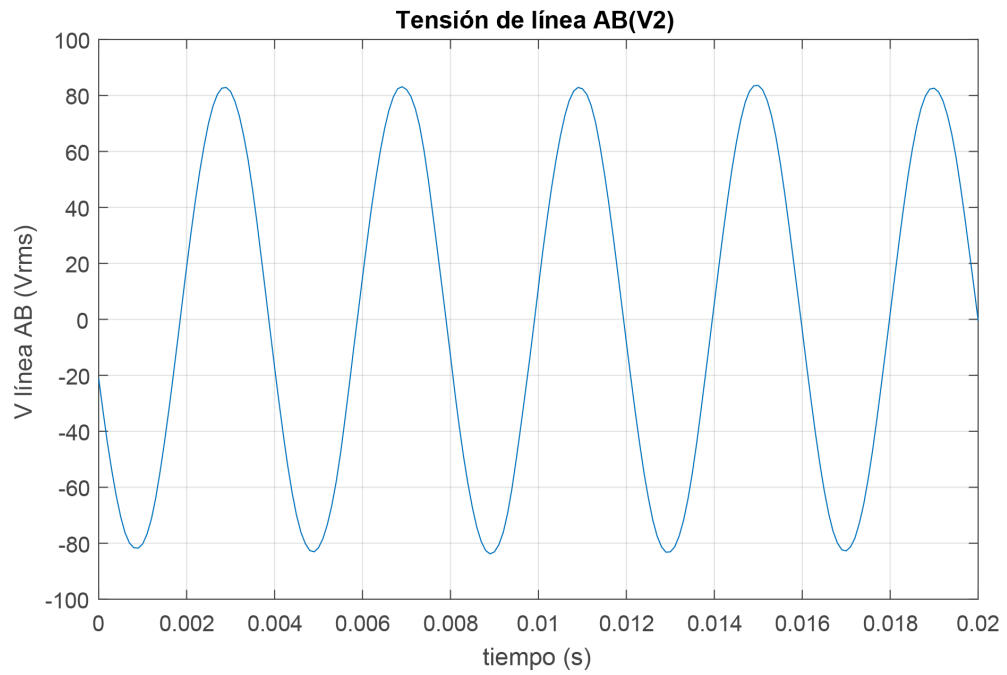


Figura A.2 Tensión de línea AB prueba V2. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia.

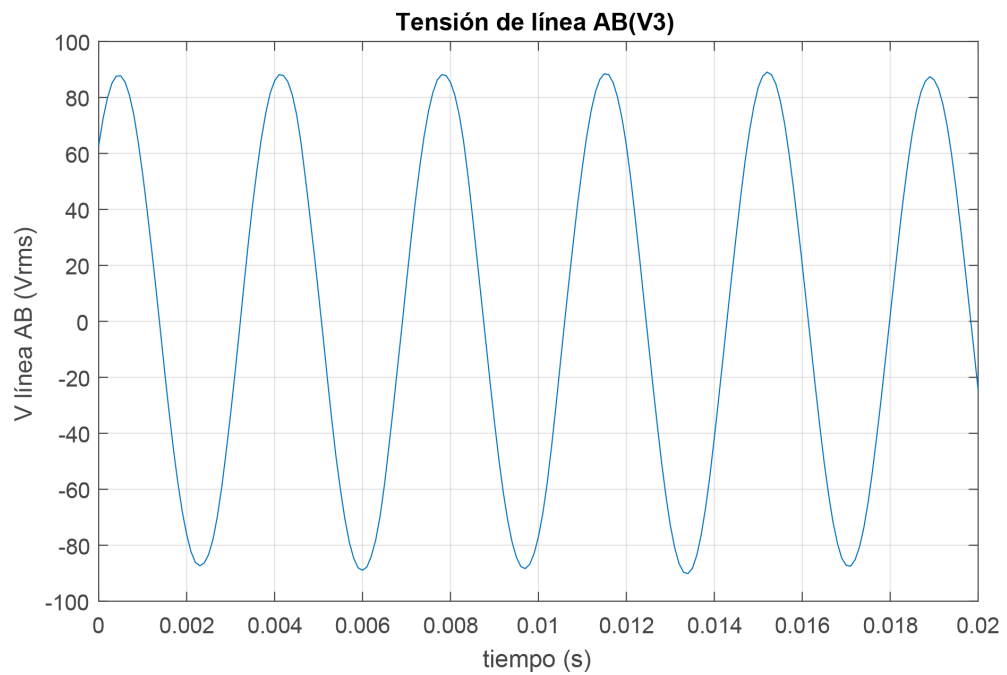


Figura A.3 Tensión de línea AB prueba V3. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia.

A.2 Intensidades de fase A

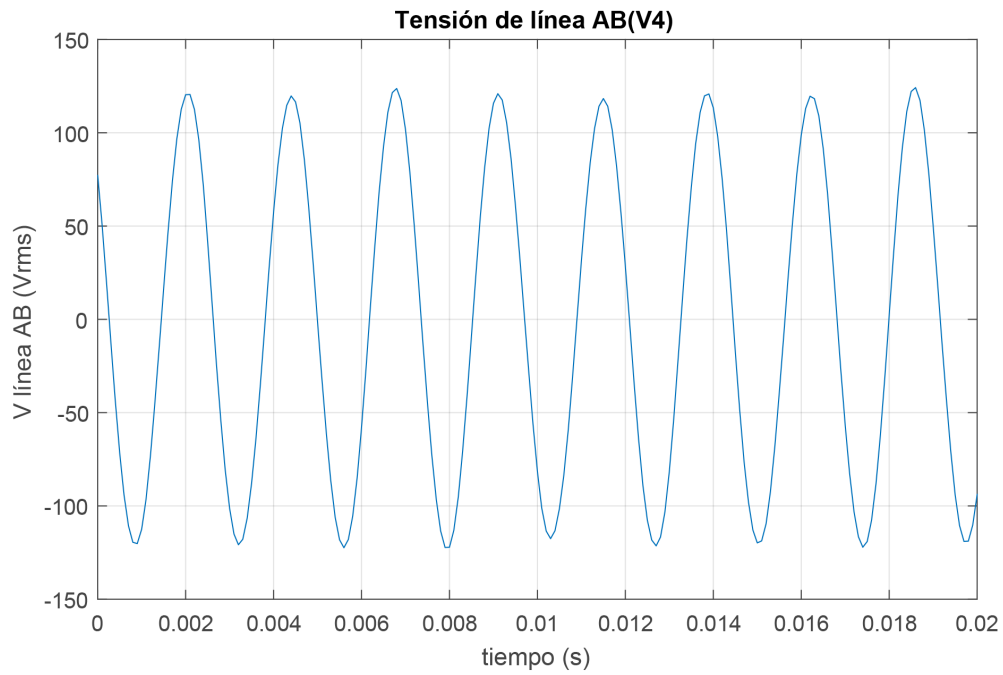


Figura A.4 Tensión de línea AB prueba V4. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia.

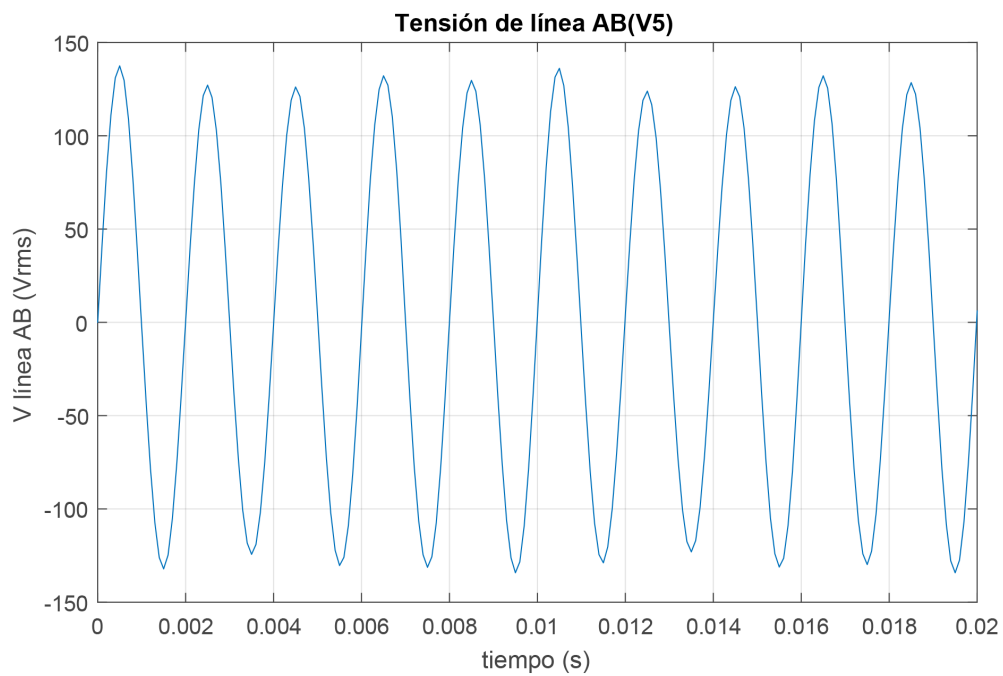


Figura A.5 Tensión de línea AB prueba V5. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia.

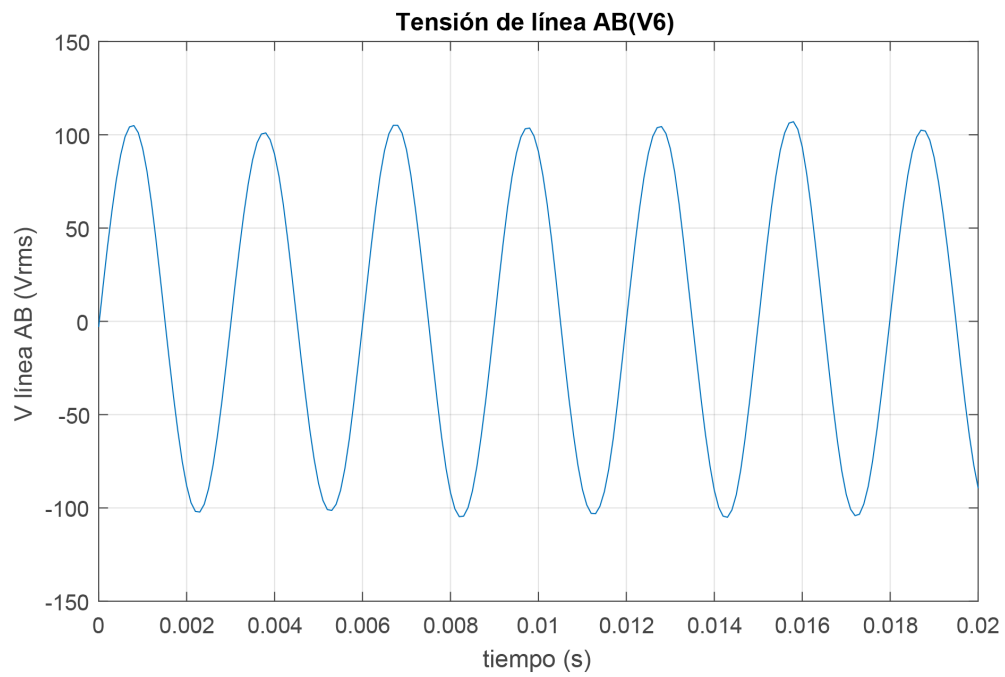


Figura A.6 Tensión de línea AB prueba V6. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia.

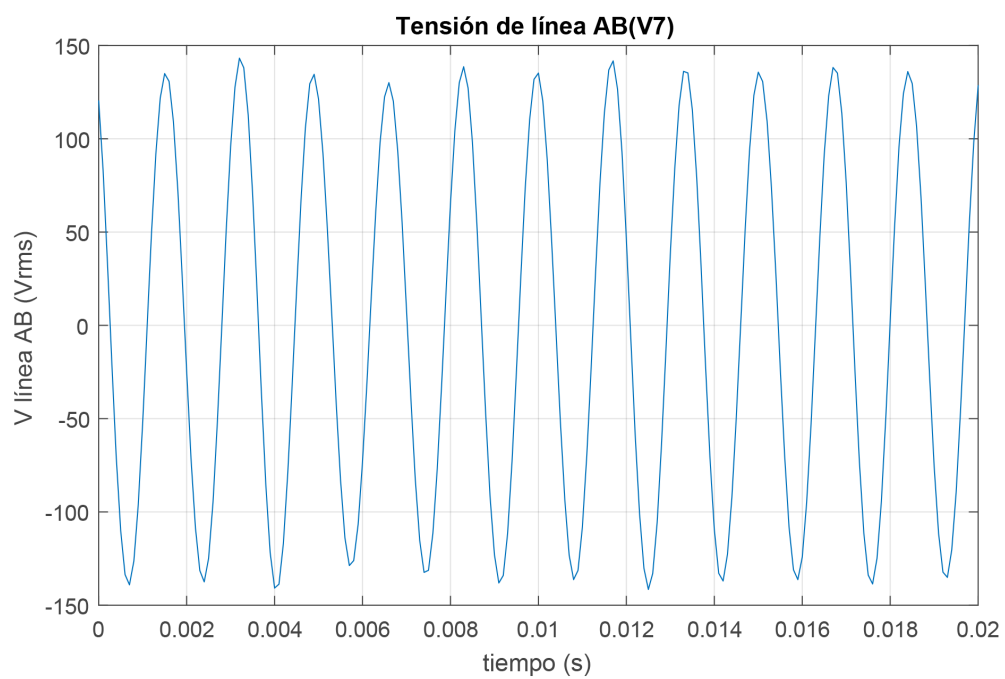


Figura A.7 Tensión de línea AB prueba V6. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia.

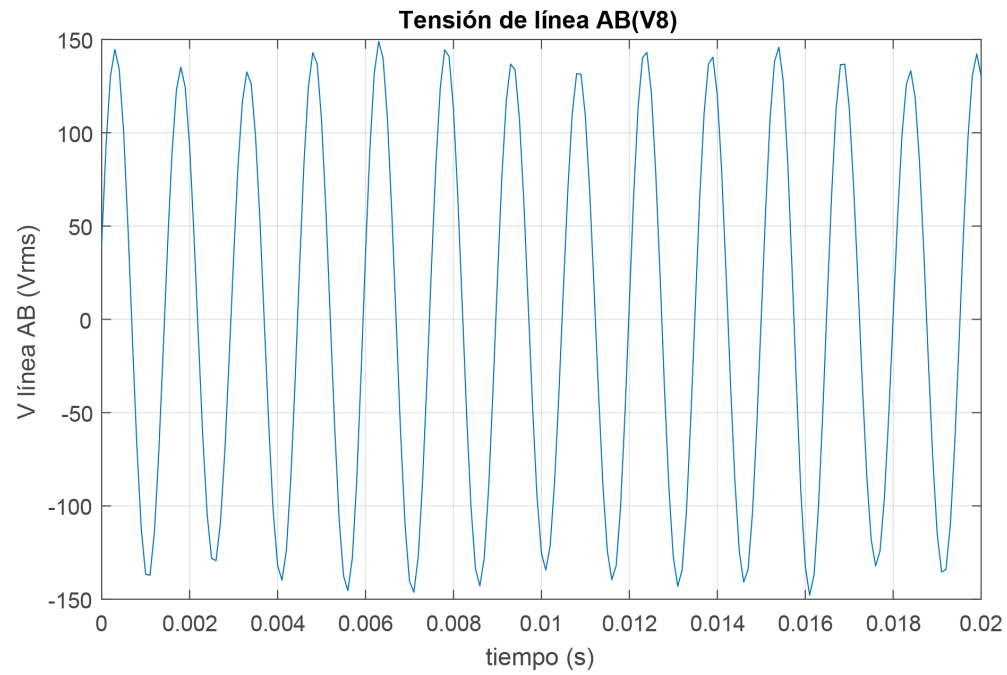


Figura A.8 Tensión de línea AB prueba V8. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia.

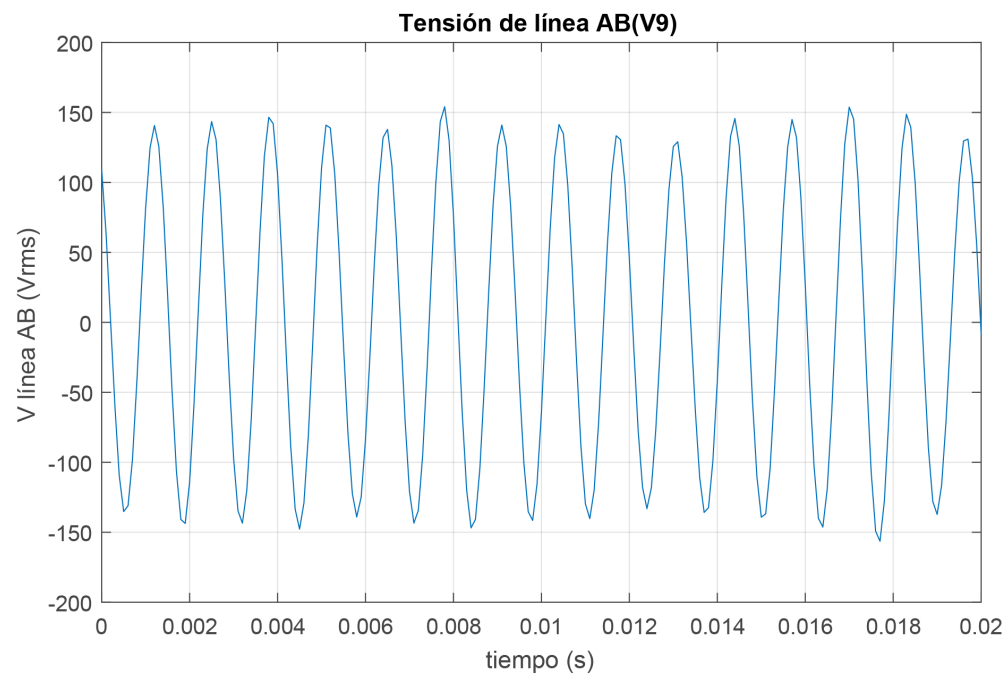


Figura A.9 Tensión de línea AB prueba V9. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia.

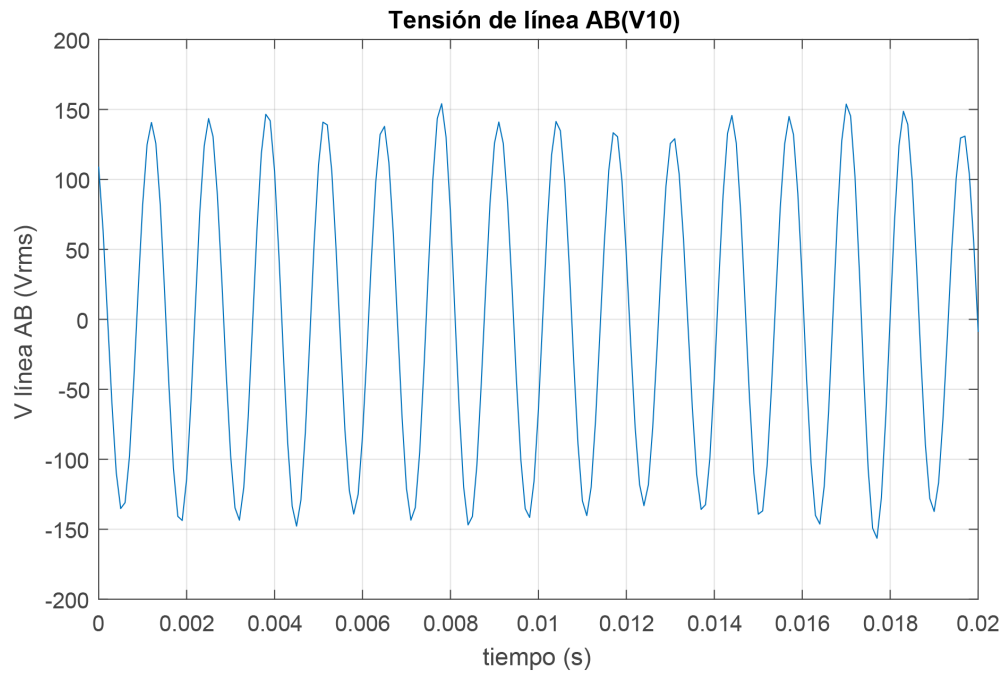


Figura A.10 Tensión de línea AB prueba V10. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia.

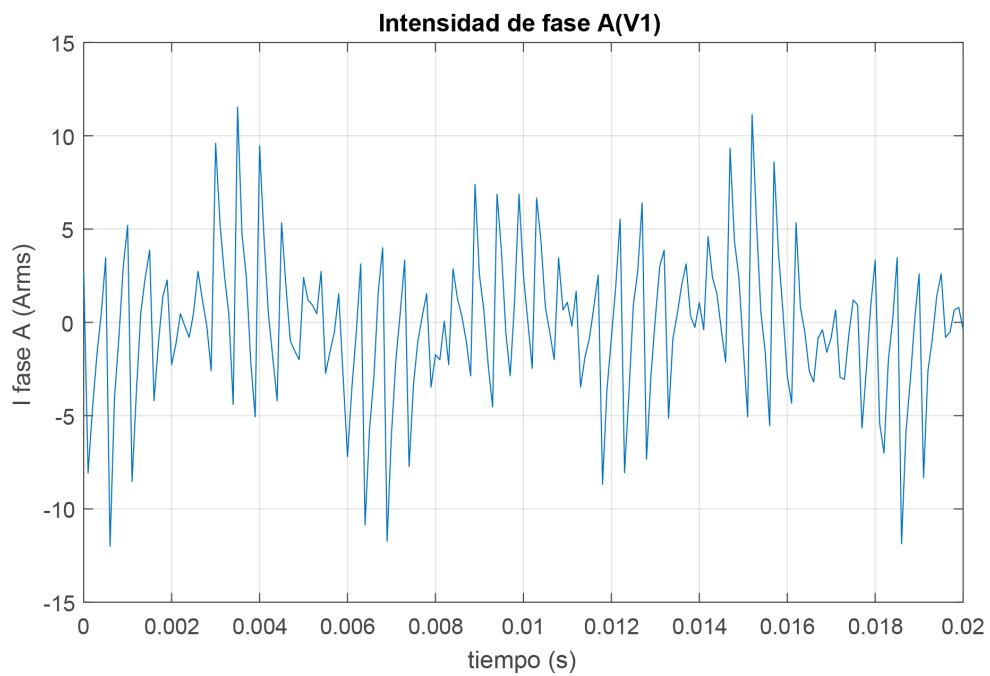


Figura A.11 Intensidad de fase A prueba V1. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia.

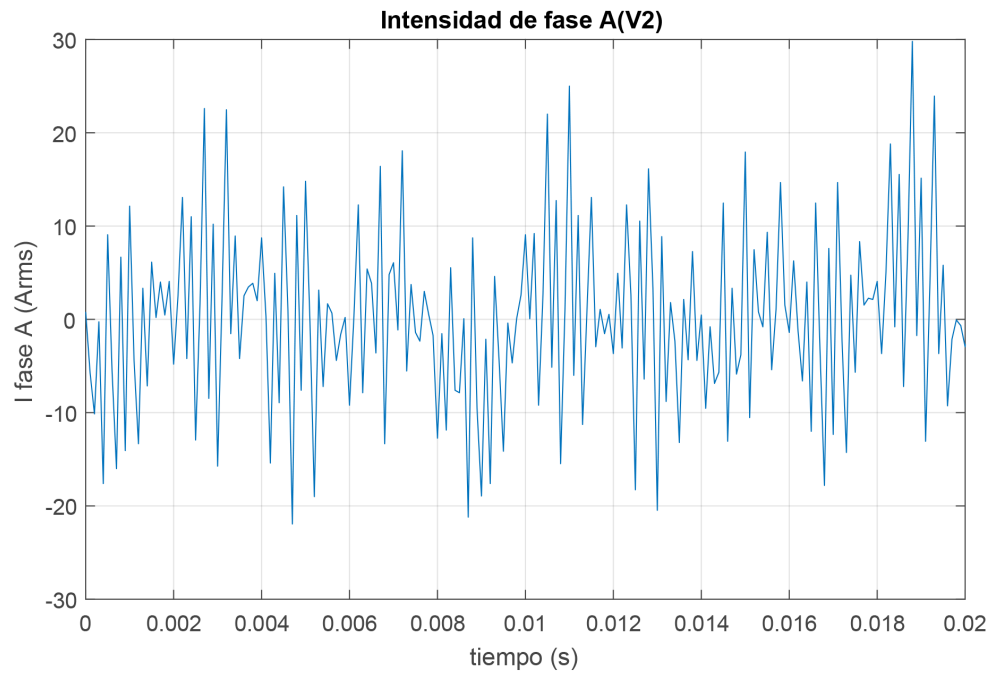


Figura A.12 Intensidad de fase A prueba V2. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia.

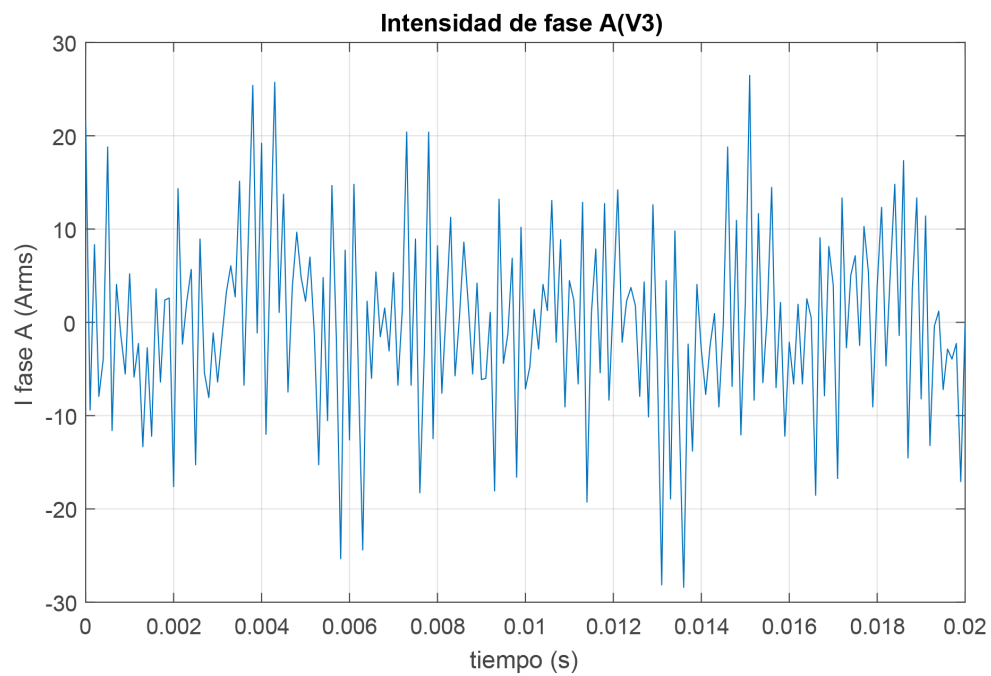


Figura A.13 Intensidad de fase A prueba V3. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia.

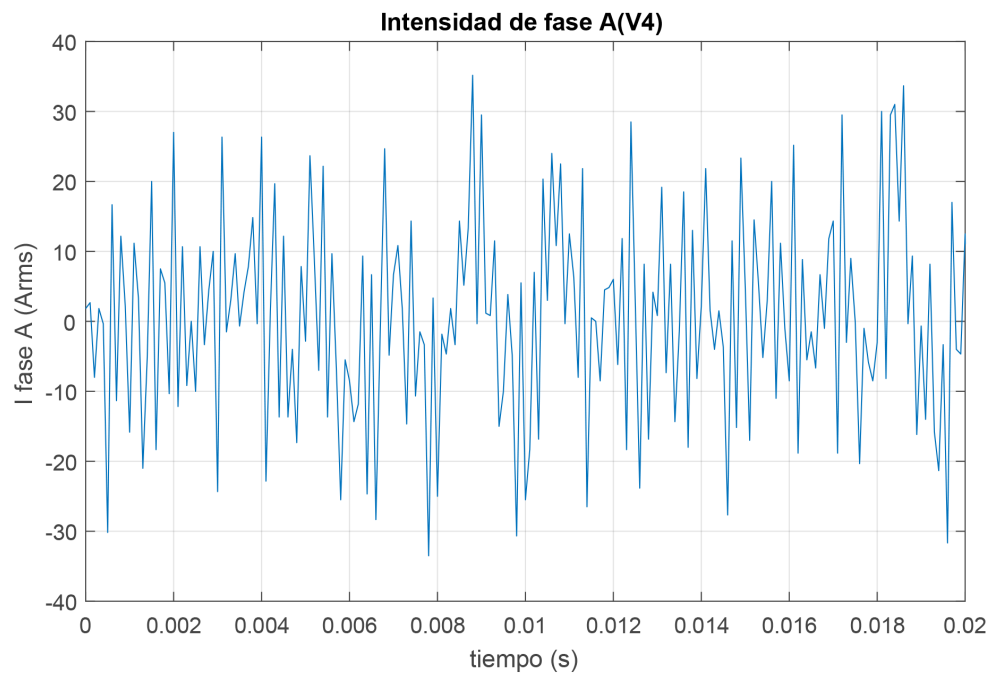


Figura A.14 Intensidad de fase A prueba V4. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia.

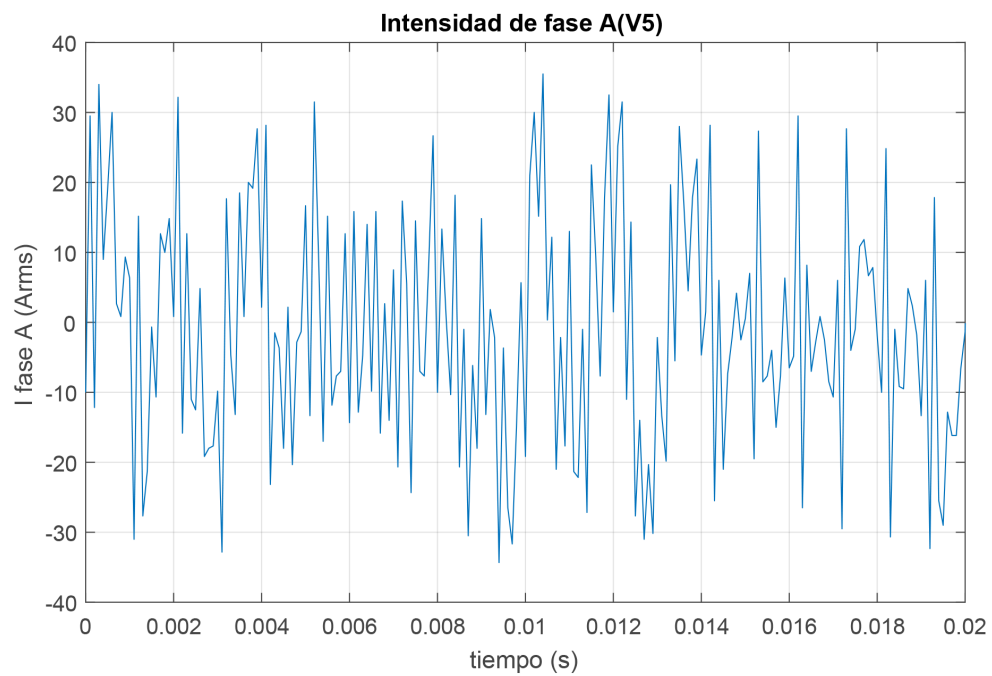


Figura A.15 Intensidad de fase A prueba V5. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia.

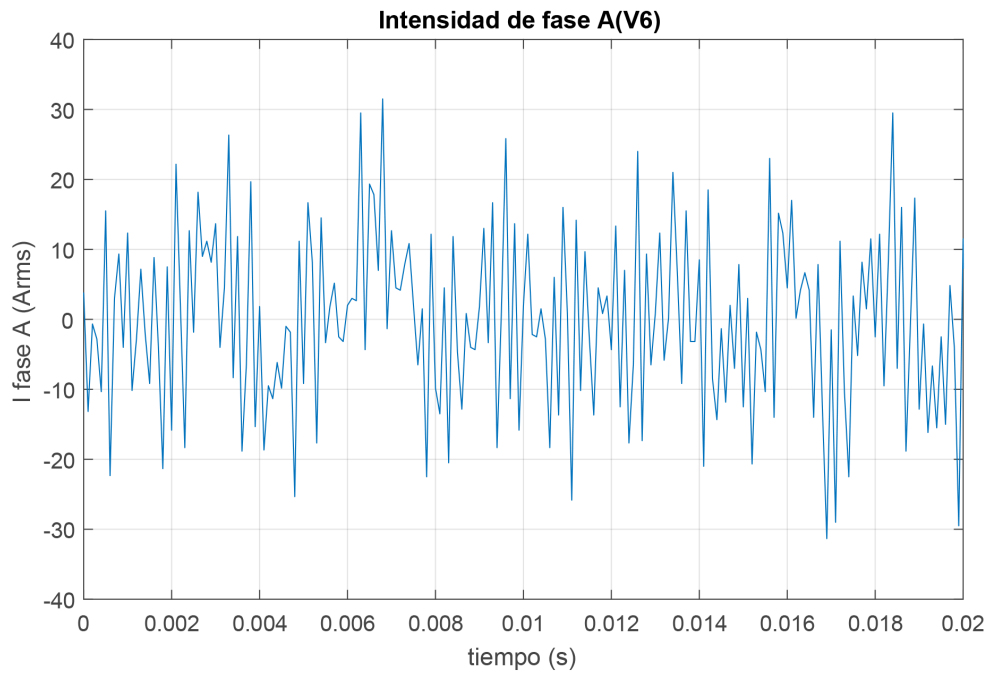


Figura A.16 Intensidad de fase A prueba V6. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia.

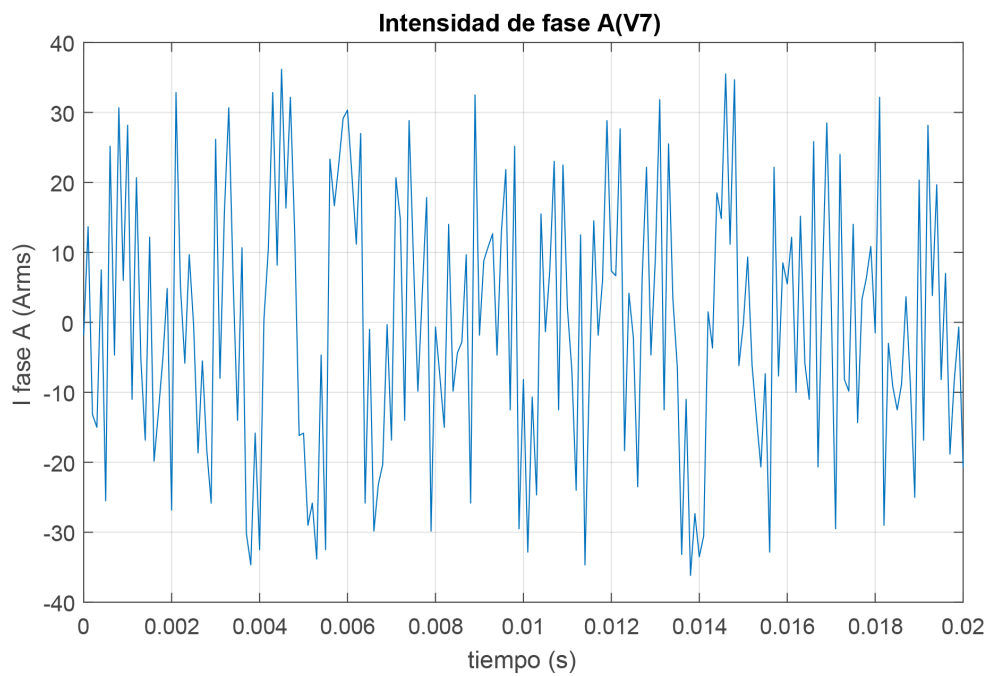


Figura A.17 Intensidad de fase A prueba V7. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia.

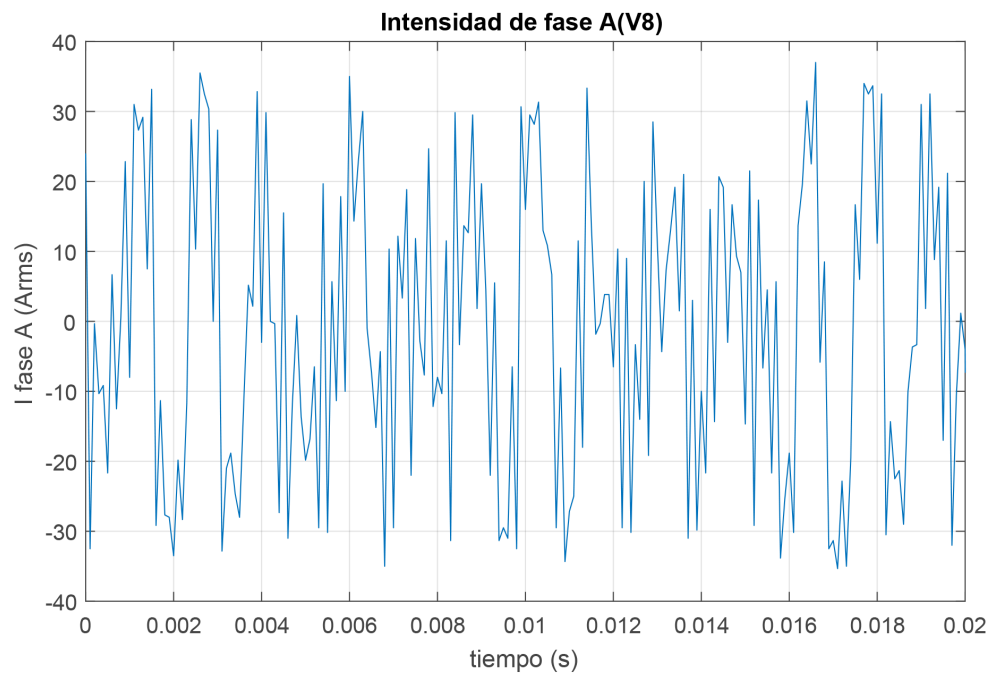


Figura A.18 Intensidad de fase A prueba V8. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia.

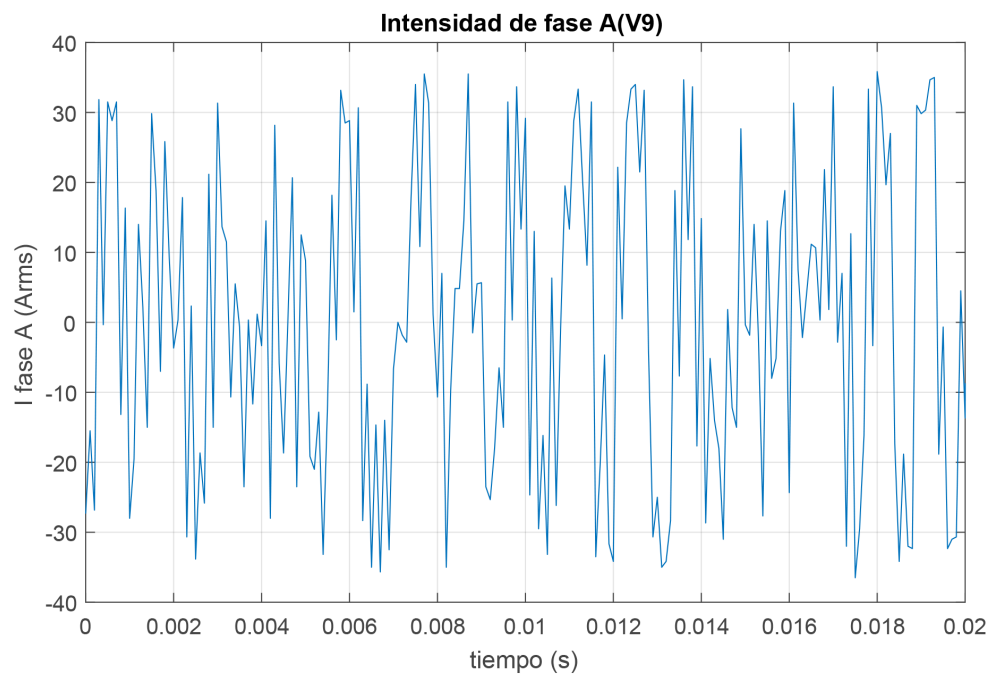


Figura A.19 Intensidad de fase A prueba V9. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia.

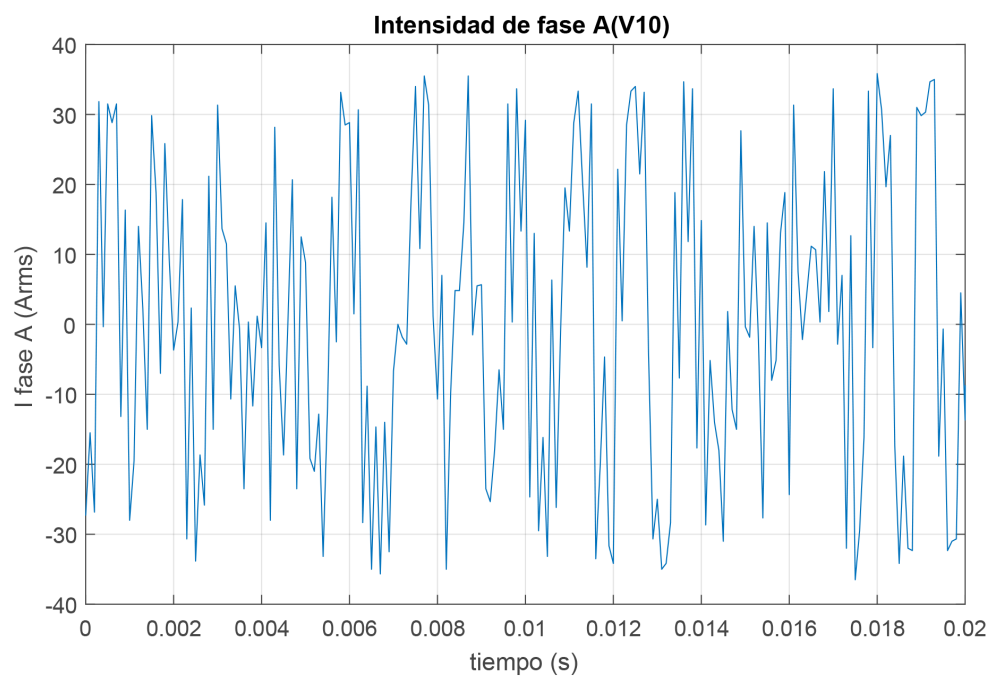


Figura A.20 Intensidad de fase A prueba V10. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia.

Apéndice B

Gráficas del ensayo en vacío del 10 de junio

Se presentan en este apéndice la evolución temporal de:

- Tensiones de fase A y C
- Análisis FFT de la tensión de fase A
- Análisis FFT de la tensión de fase A filtrada a 12 kHz
- Análisis FFR de la tensión de línea AB
- Análisis FFR de la tensión de línea AB filtrada a 12 kHz

B.1 Tensiones de fase A y C

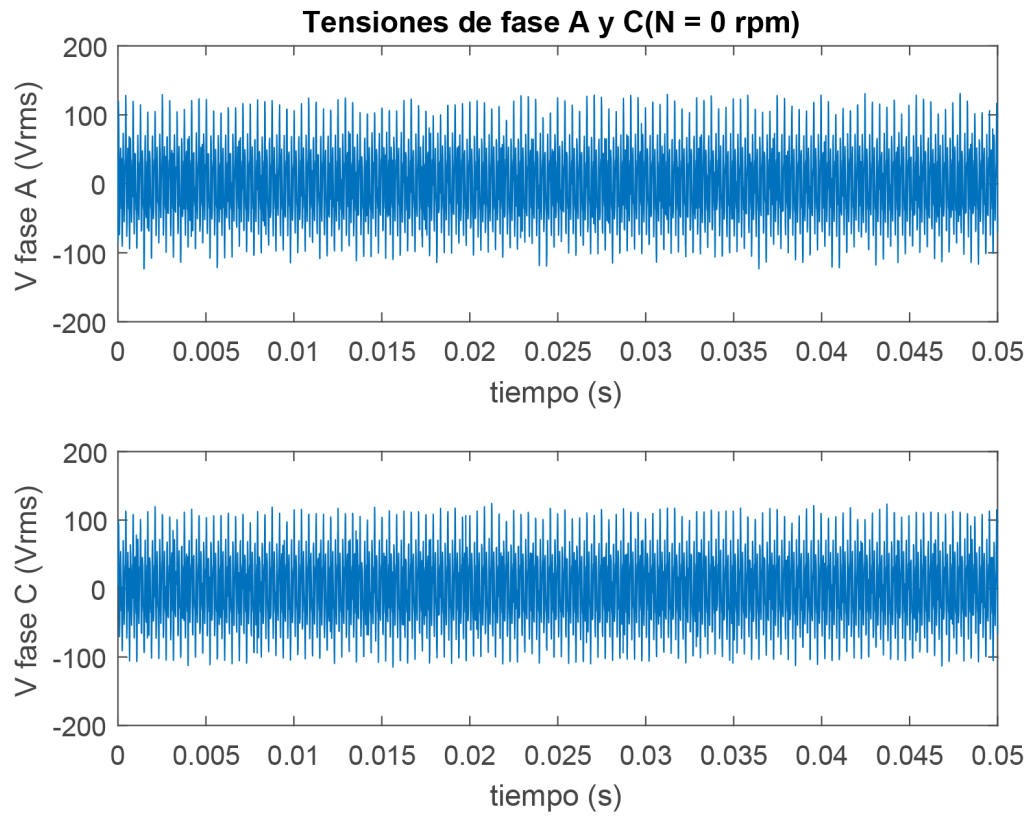


Figura B.1 Tensiones de fase A y C prueba 0 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

B.2 Análisis FFT de la tensión de fase A

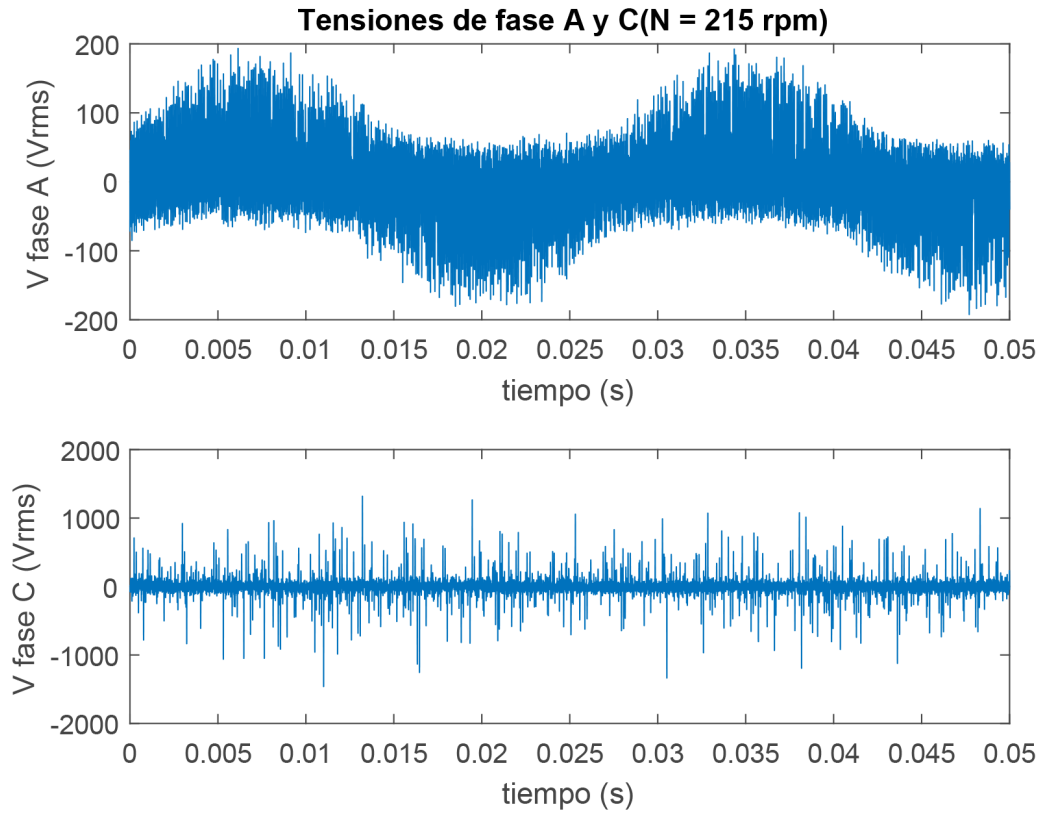


Figura B.2 Tensiones de fase A y C prueba 215 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

B.3 Análisis FFT de la tensión de fase A filtrada a 12 kHz

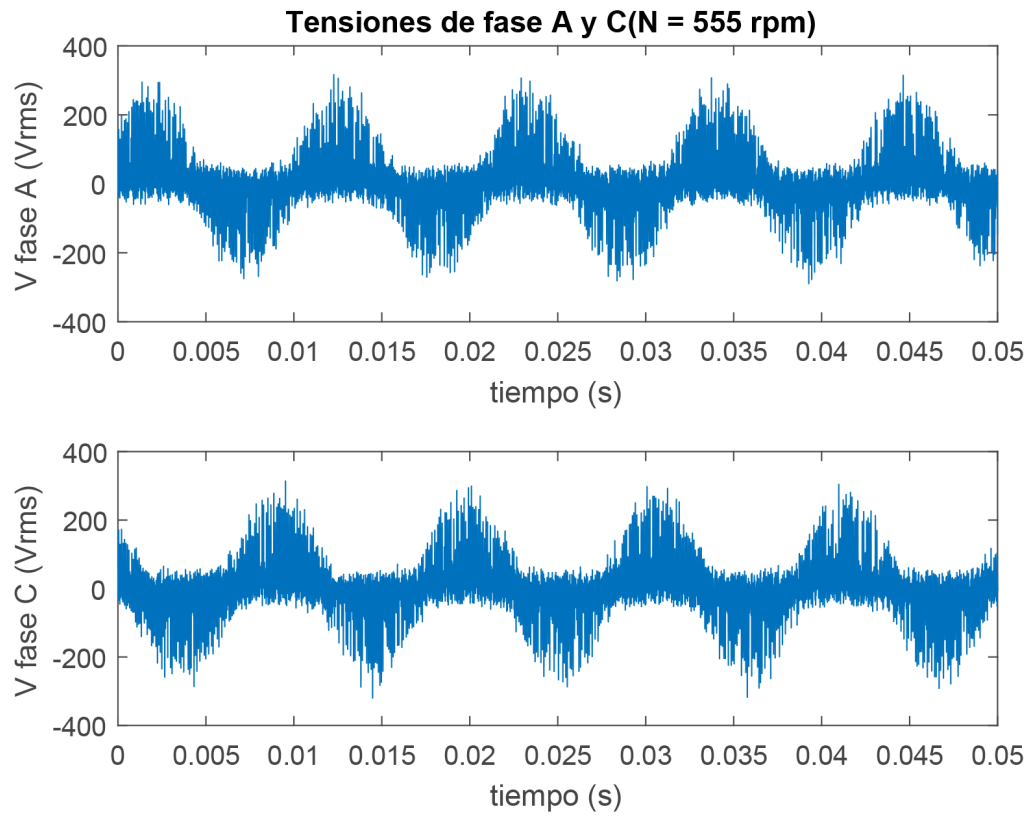


Figura B.3 Tensiones de fase A y C prueba 555 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

B.4 Análisis FFT de la tensión de línea AB

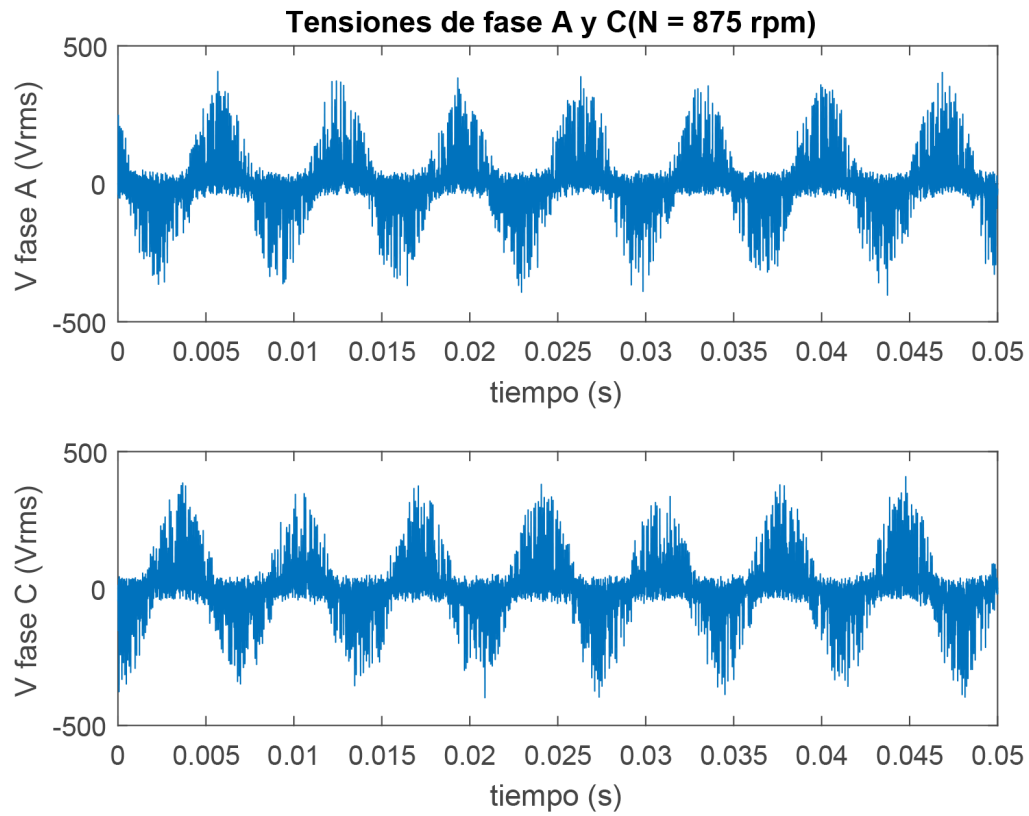


Figura B.4 Tensiones de fase A y C prueba 875 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

B.5 Análisis FFT de la tensión de línea AB filtrada

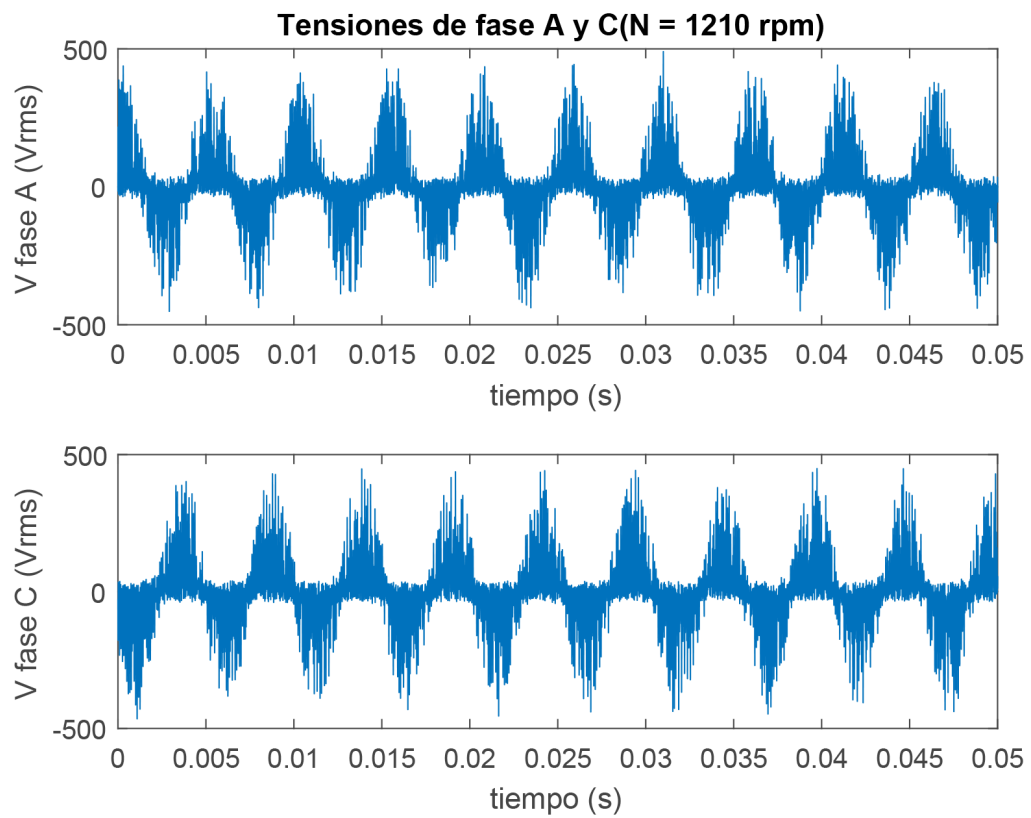


Figura B.5 Tensiones de fase A y C prueba 1210 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

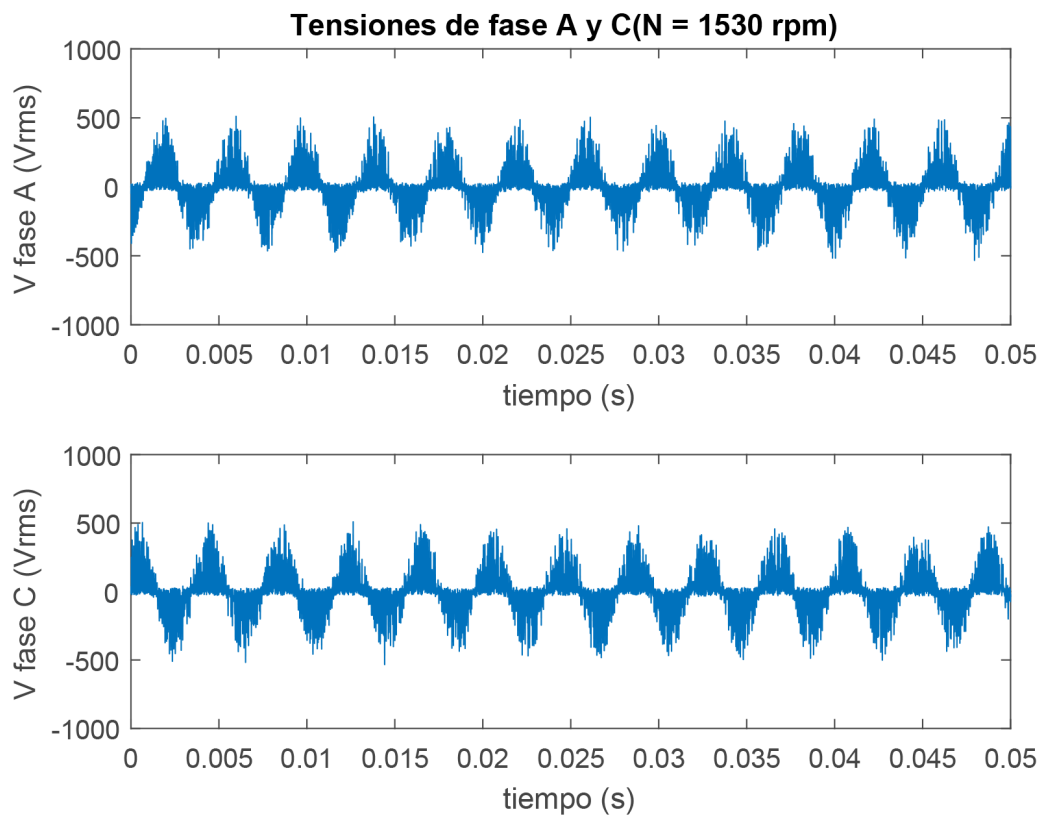


Figura B.6 Tensiones de fase A y C prueba 1530 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

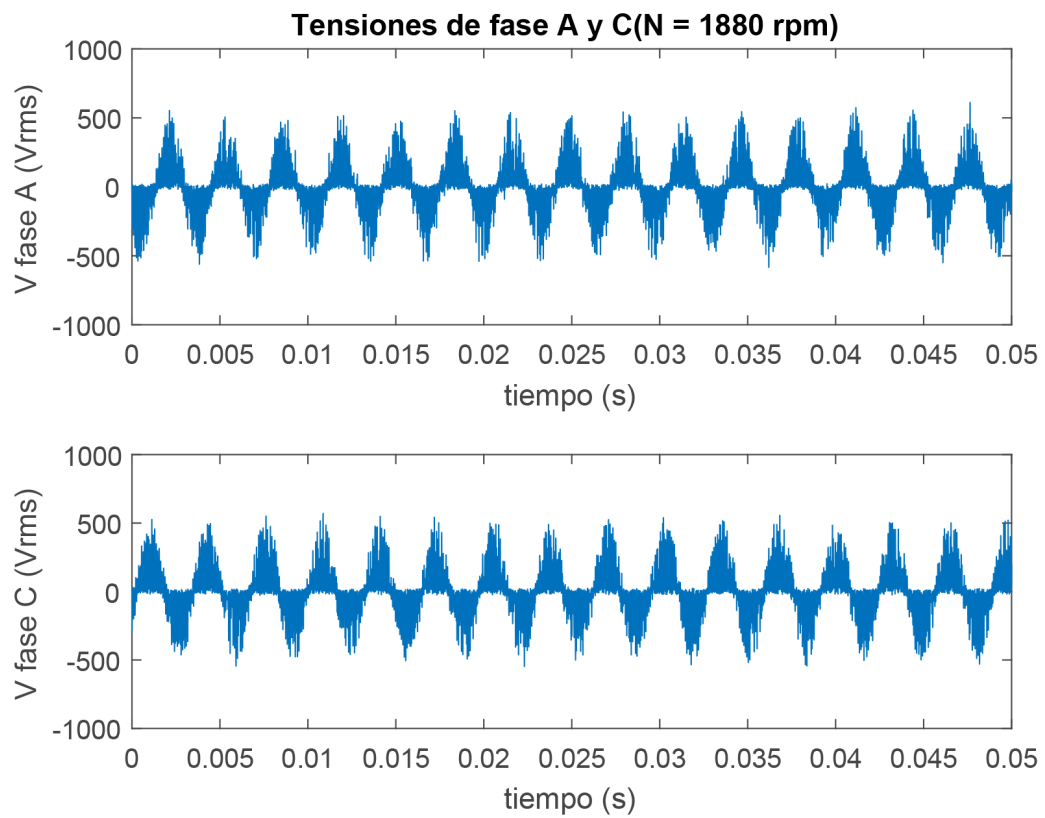


Figura B.7 Tensiones de fase A y C prueba 1880 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

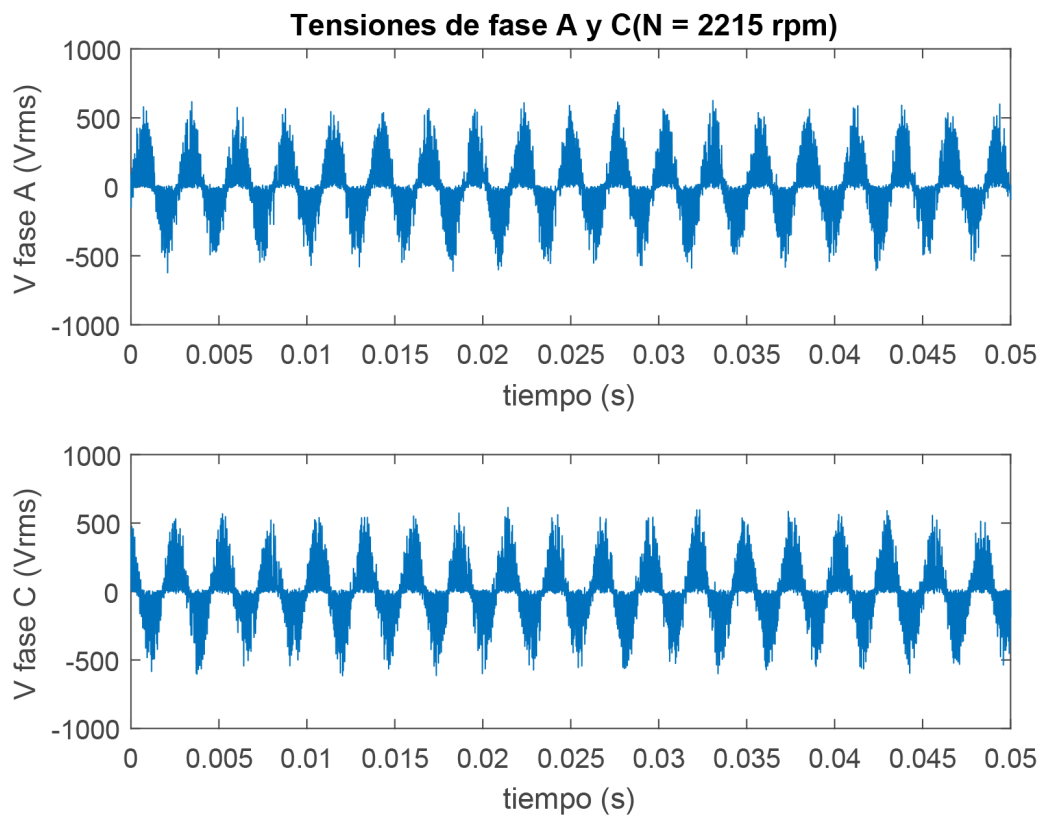


Figura B.8 Tensiones de fase A y C prueba 2215 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

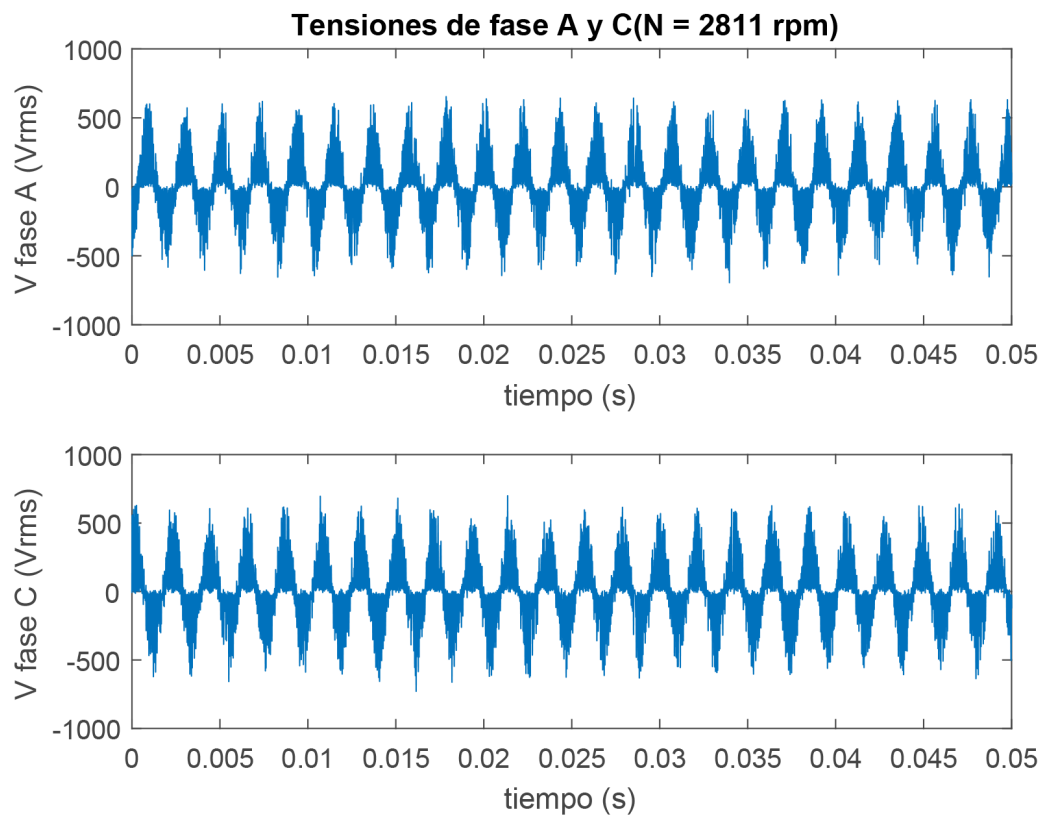


Figura B.9 Tensiones de fase A y C prueba 2811 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

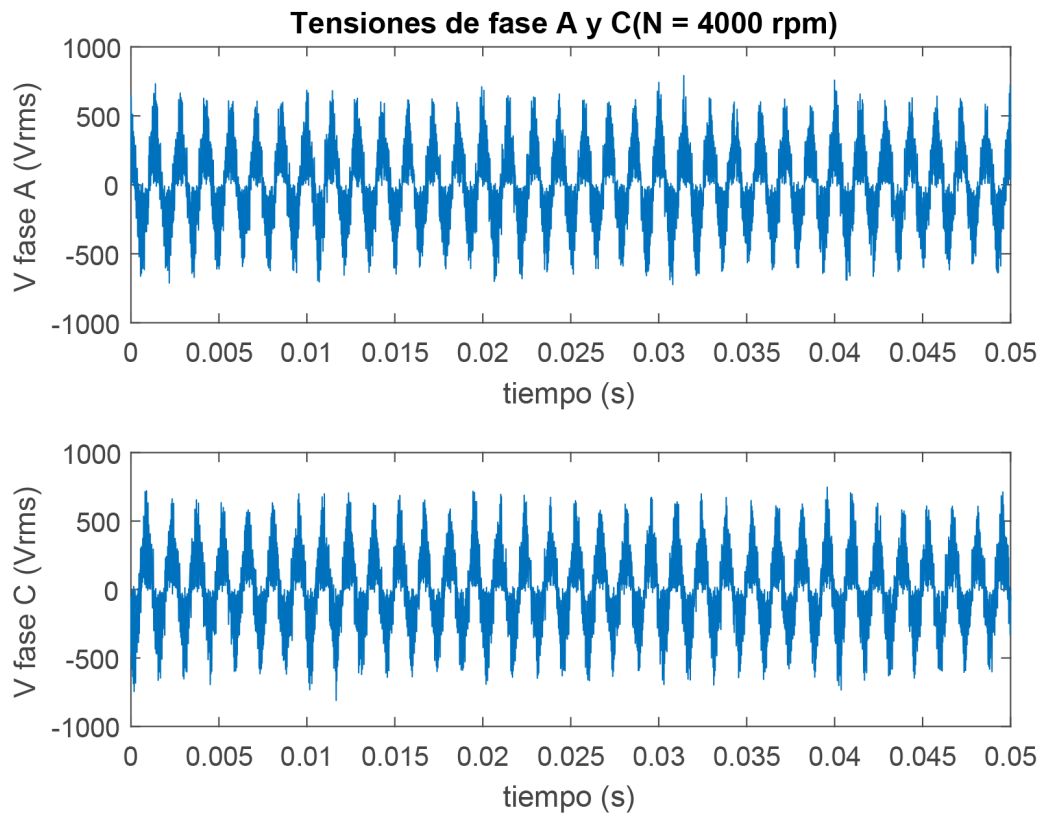


Figura B.10 Tensiones de fase A y C prueba 4000 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

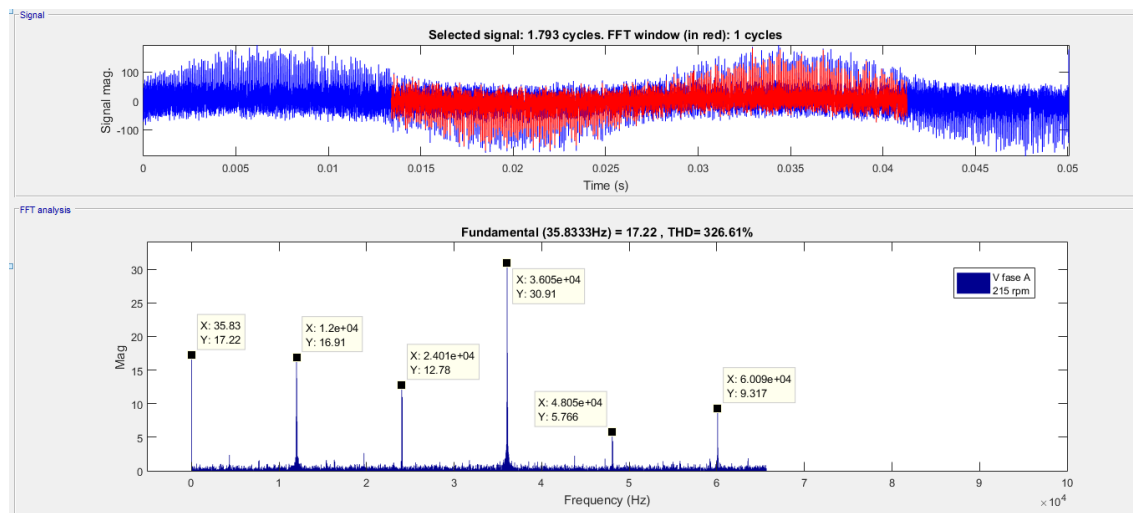


Figura B.11 Análisis en frecuencia de la tensión de fase A prueba 215 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

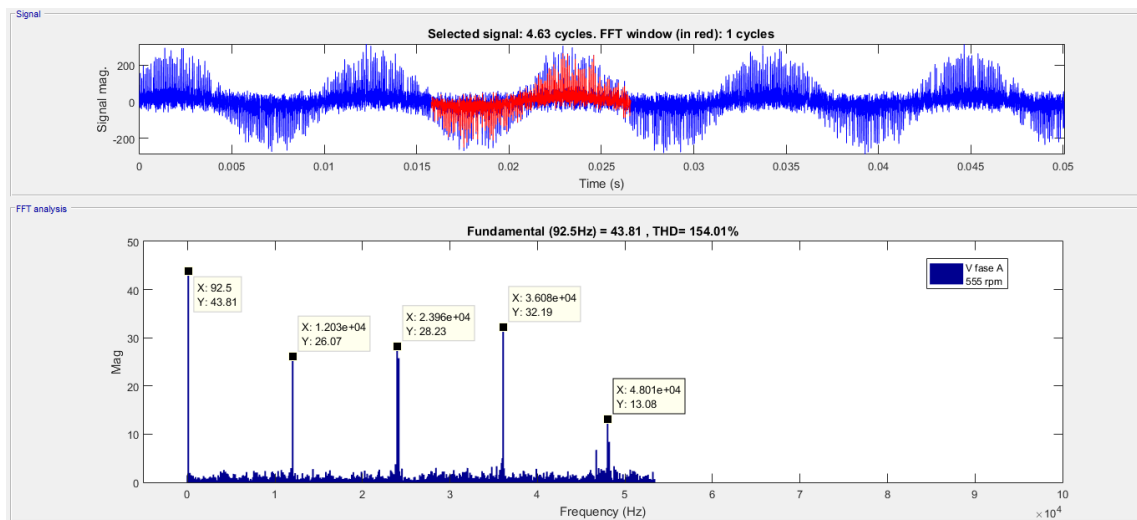


Figura B.12 Análisis en frecuencia de la tensión de fase A prueba 555 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

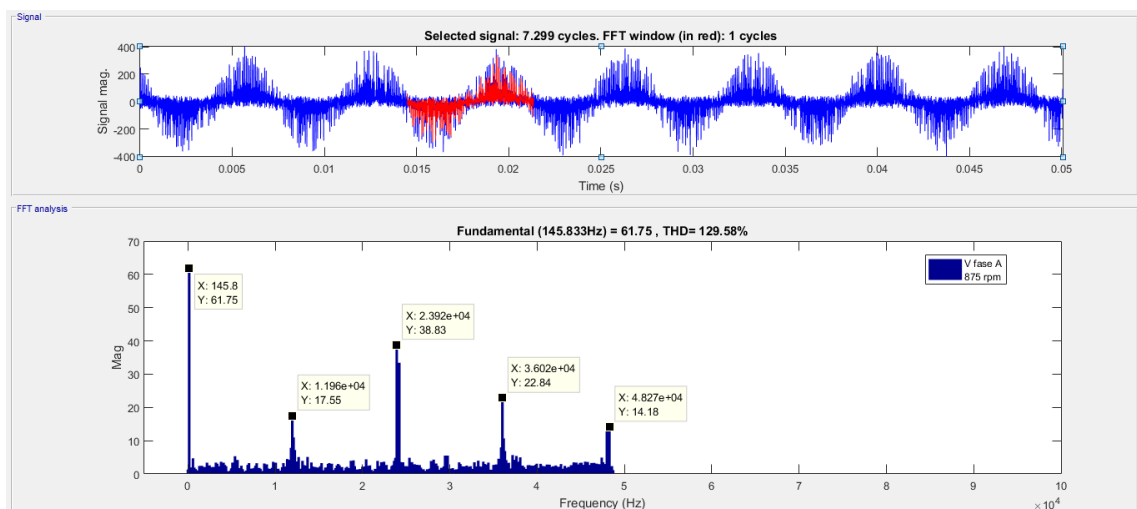


Figura B.13 Análisis en frecuencia de la tensión de fase A prueba 875 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

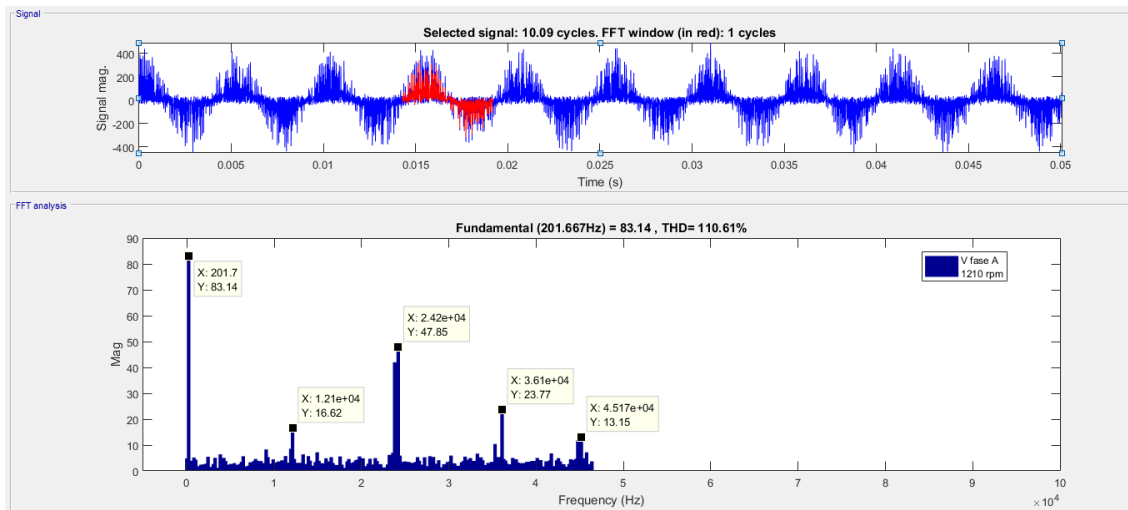


Figura B.14 Análisis en frecuencia de la tensión de fase A prueba 1210 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

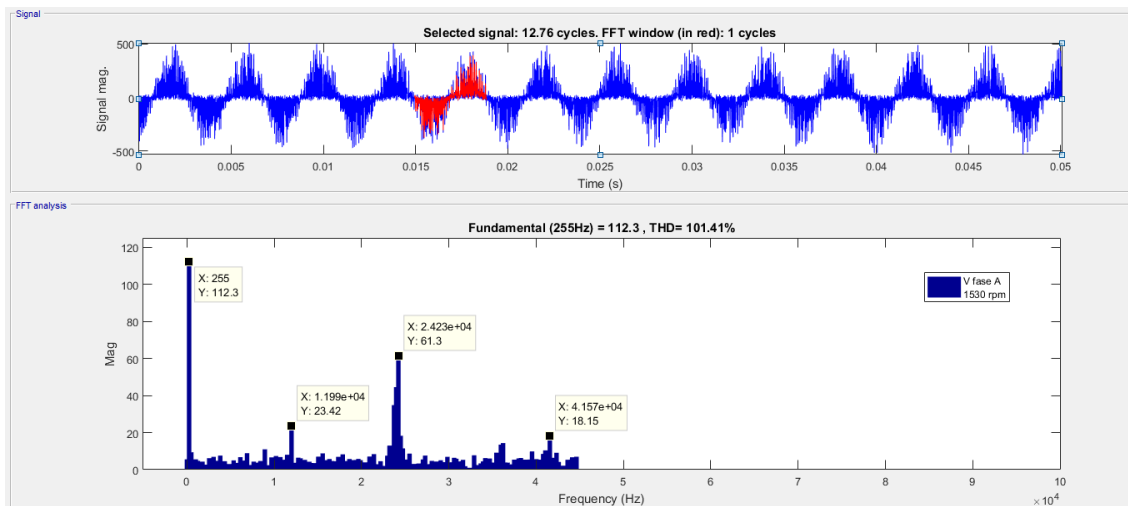


Figura B.15 Análisis en frecuencia de la tensión de fase A prueba 1530 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

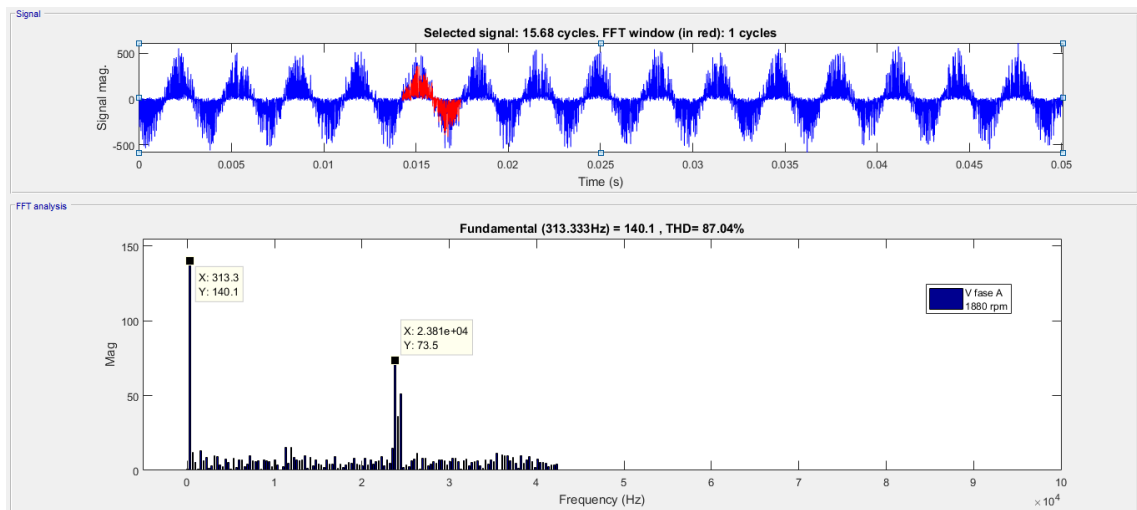


Figura B.16 Análisis en frecuencia de la tensión de fase A prueba 1880 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

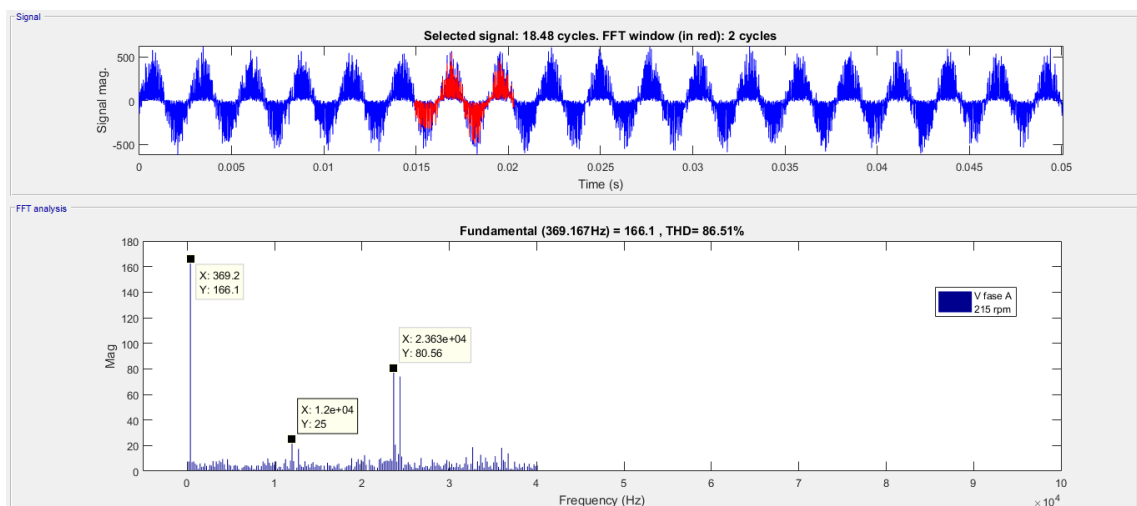


Figura B.17 Análisis en frecuencia de la tensión de fase A prueba 2215 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

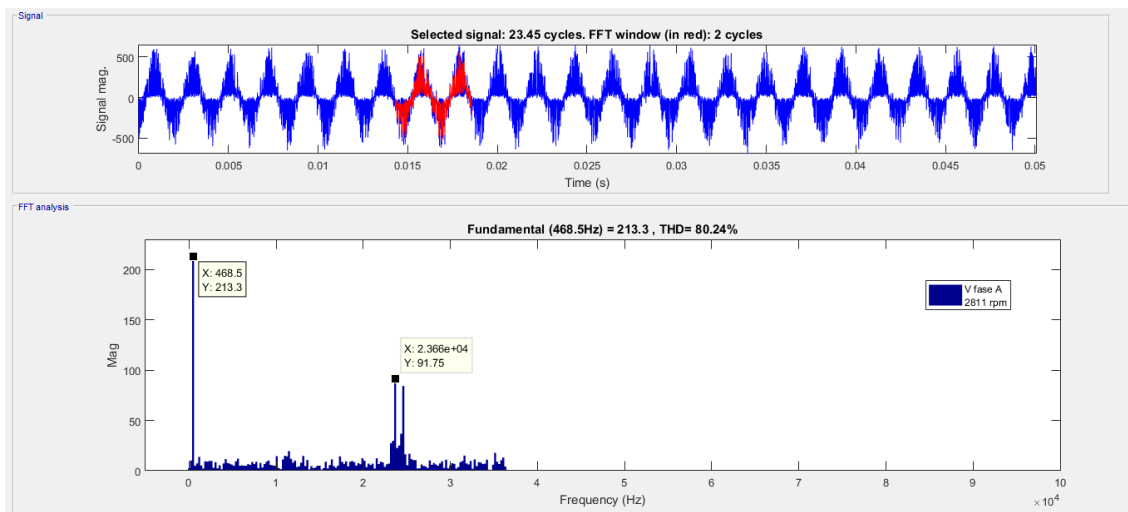


Figura B.18 Análisis en frecuencia de la tensión de fase A prueba 2811 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

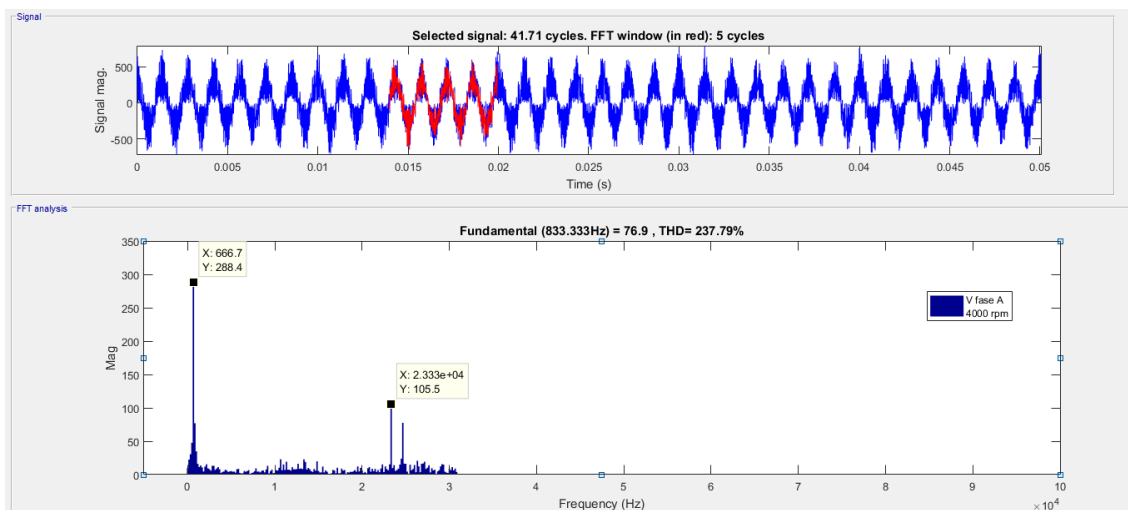


Figura B.19 Análisis en frecuencia de la tensión de fase A prueba 4000 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

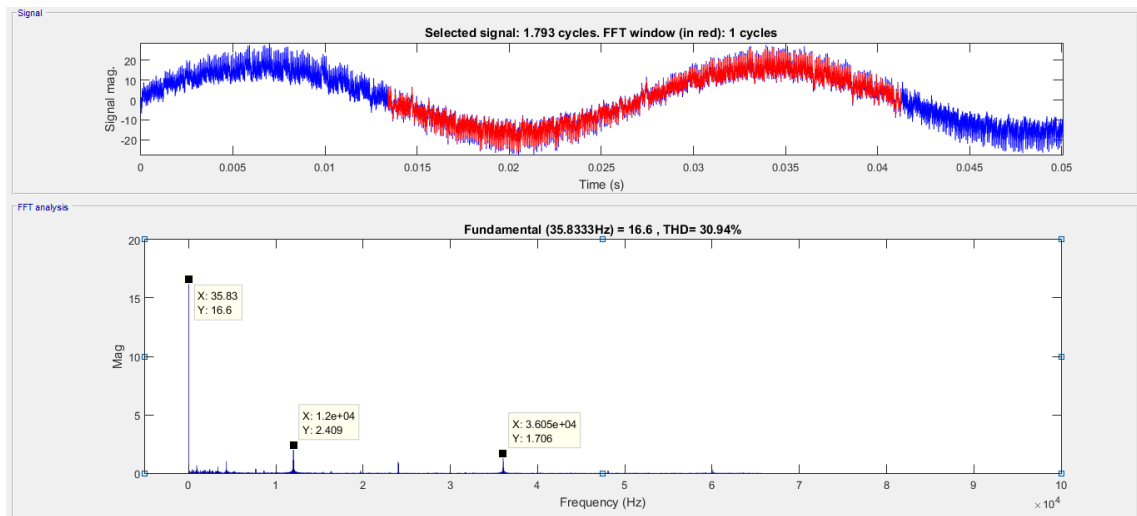


Figura B.20 Análisis en frecuencia de la tensión de fase A filtrada prueba 215 rpm. Ensayo del 10 de junio.
Fuente: Propia.

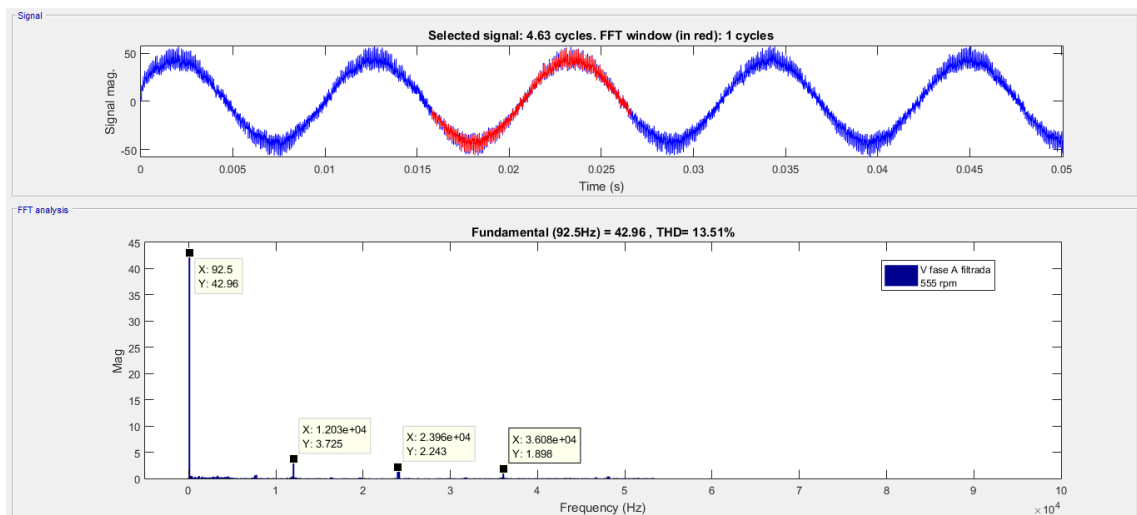


Figura B.21 Análisis en frecuencia de la tensión de fase A filtrada prueba 555 rpm. Ensayo del 10 de junio.
Fuente: Propia.

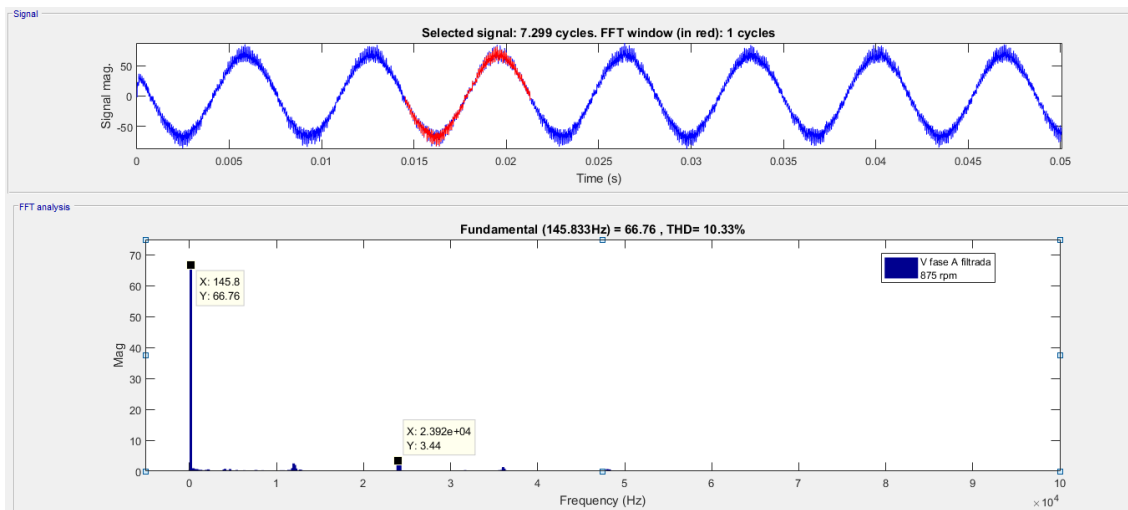


Figura B.22 Análisis en frecuencia de la tensión de fase A filtrada prueba 875 rpm. Ensayo del 10 de junio.
Fuente: Propia.

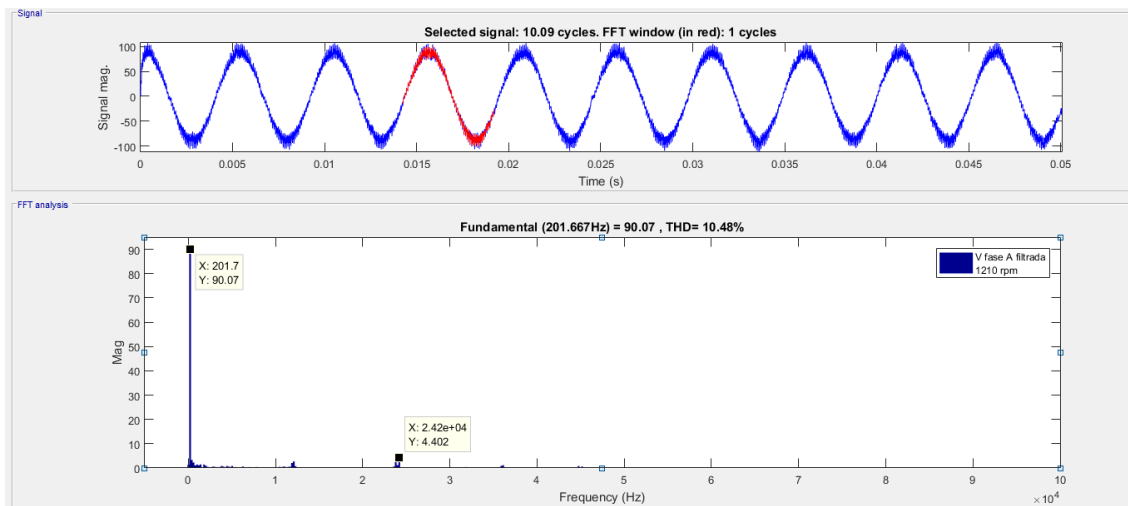


Figura B.23 Análisis en frecuencia de la tensión de fase A filtrada prueba 1210 rpm. Ensayo del 10 de junio.
Fuente: Propia.

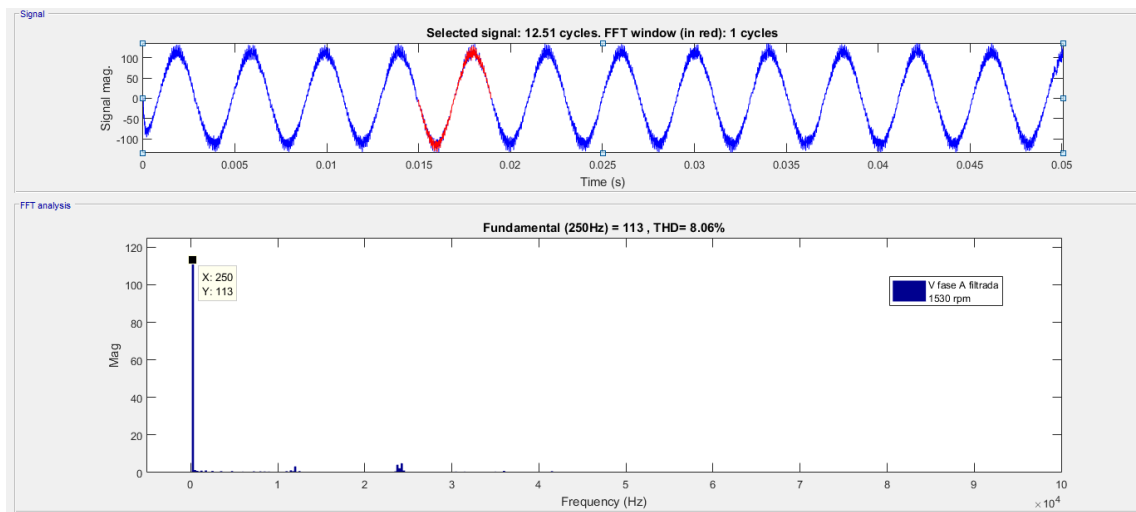


Figura B.24 Análisis en frecuencia de la tensión de fase A filtrada prueba 1530 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

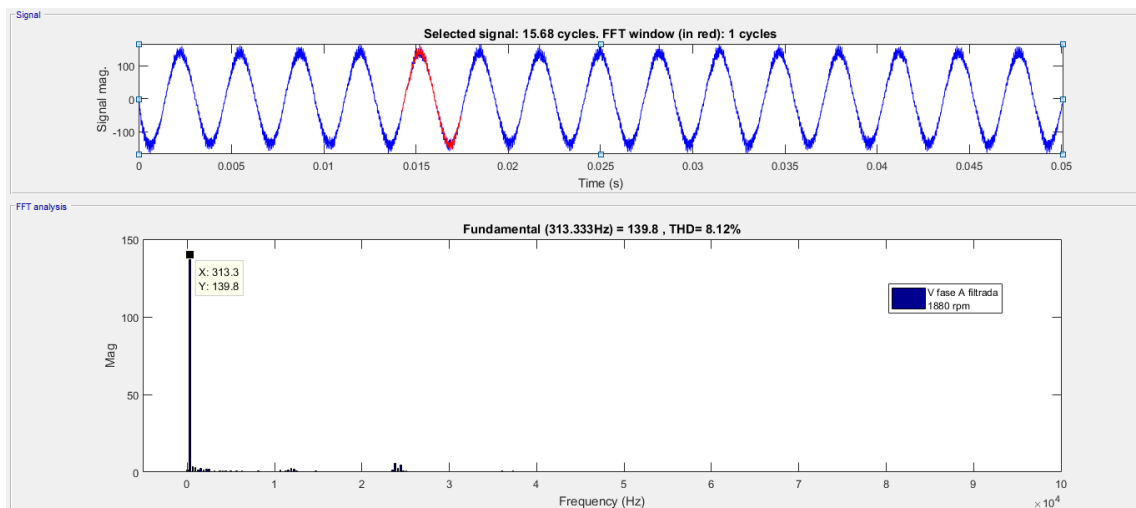


Figura B.25 Análisis en frecuencia de la tensión de fase A filtrada prueba 1880 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

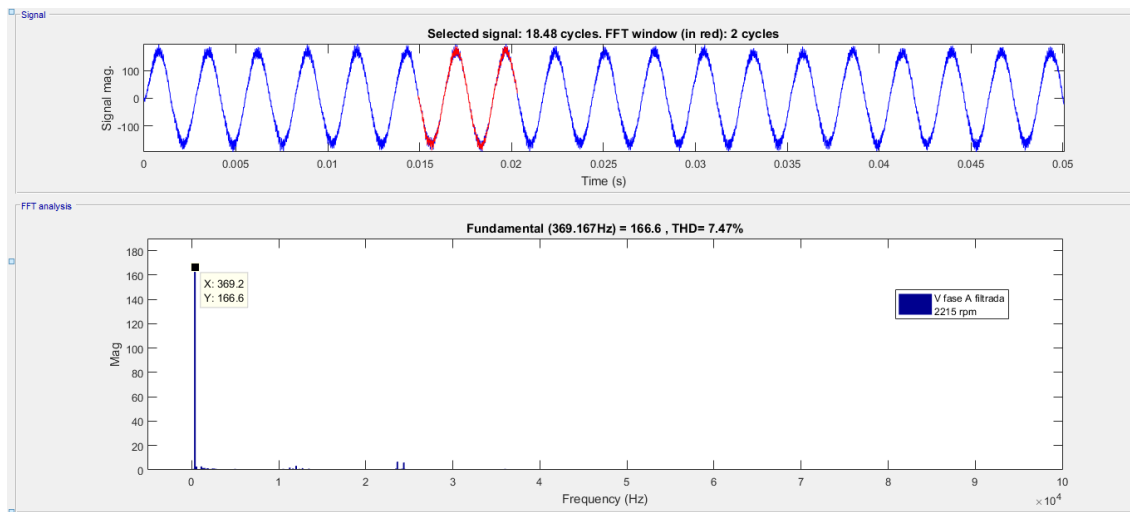


Figura B.26 Análisis en frecuencia de la tensión de fase A filtrada prueba 2215 rpm. Ensayo del 10 de junio.
Fuente: Propia.

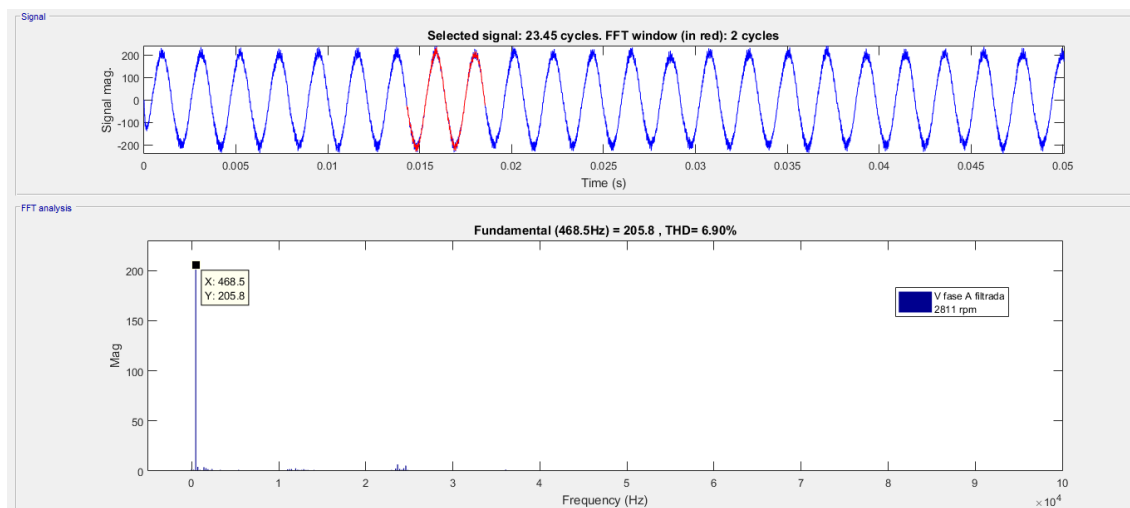


Figura B.27 Análisis en frecuencia de la tensión de fase A filtrada prueba 2811 rpm. Ensayo del 10 de junio.
Fuente: Propia.

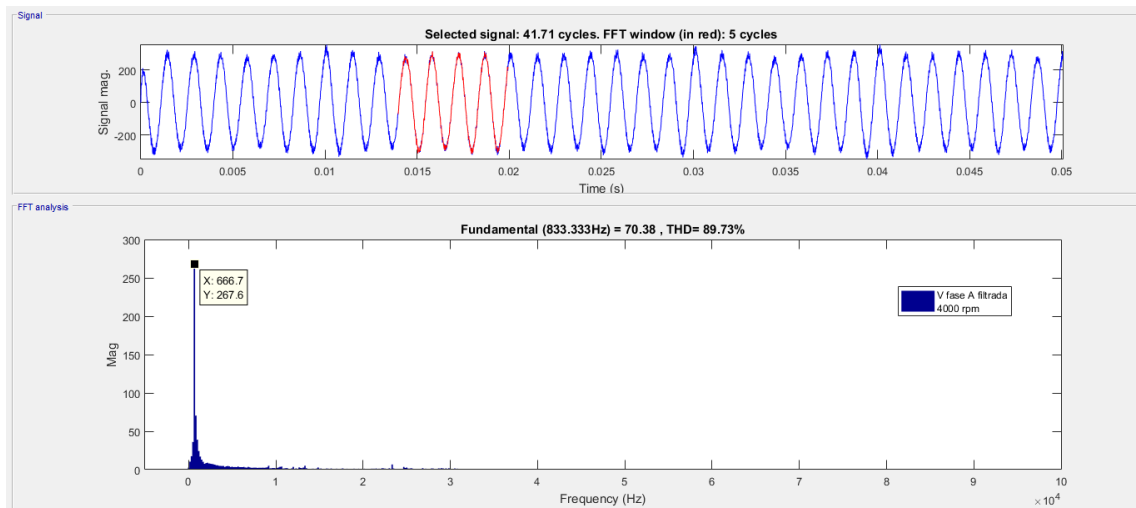


Figura B.28 Análisis en frecuencia de la tensión de fase A filtrada prueba 4000 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

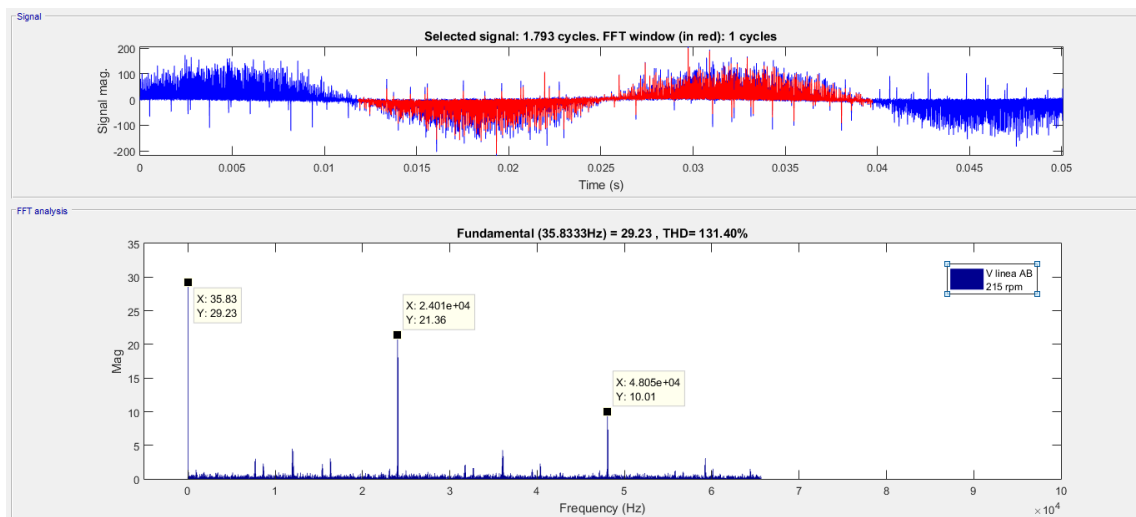


Figura B.29 Análisis FFT de la tensión de línea AB prueba 215 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

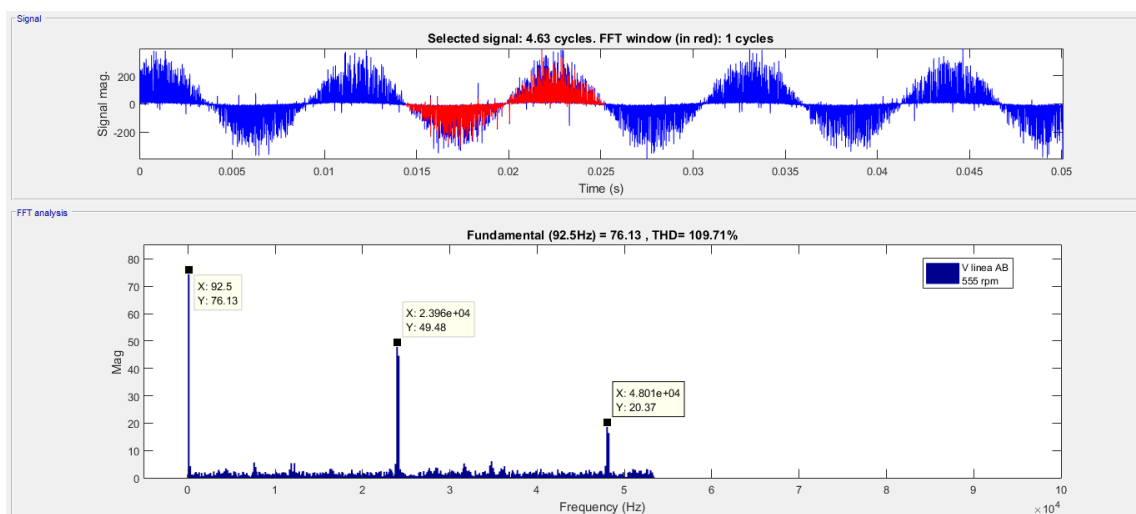


Figura B.30 Análisis FFT de la tensión de línea AB prueba 555 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

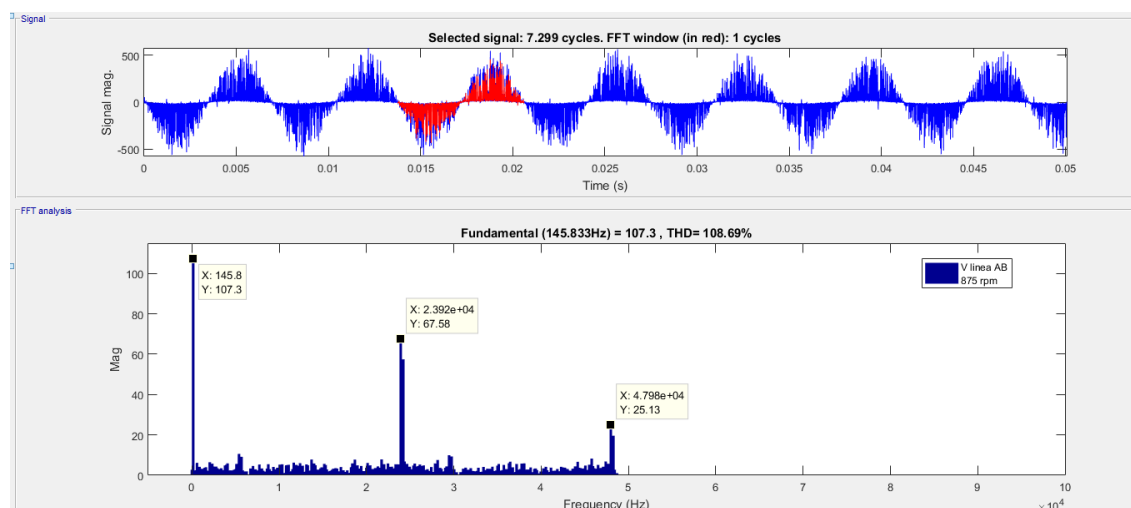


Figura B.31 Análisis FFT de la tensión de línea AB prueba 875 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

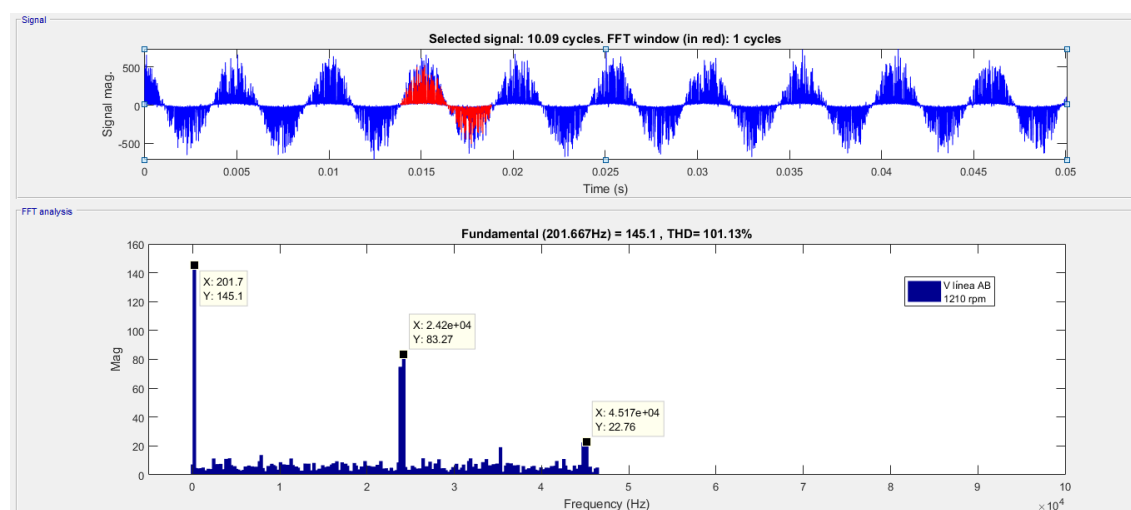


Figura B.32 Análisis FFT de la tensión de línea AB prueba 1210 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

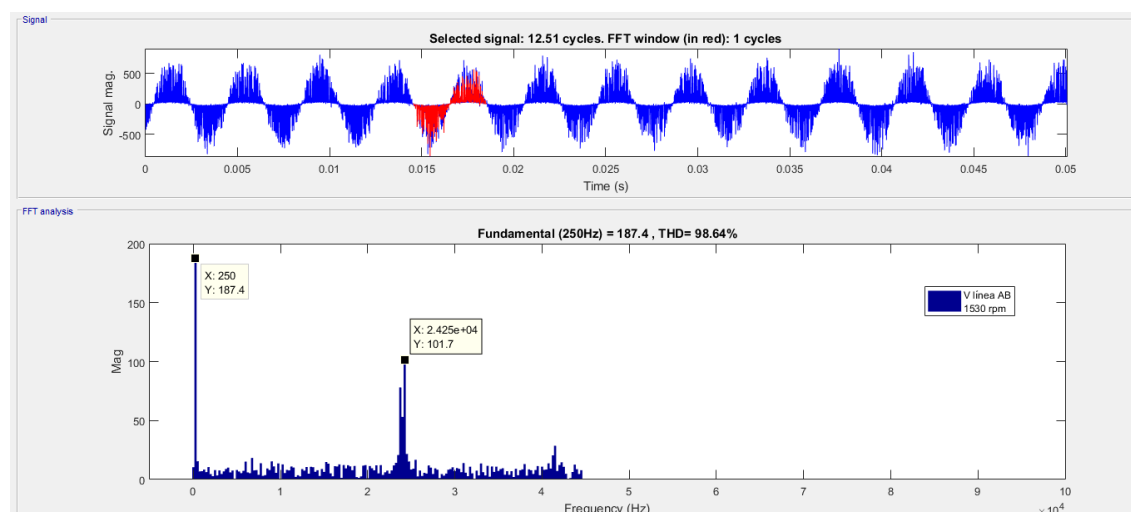


Figura B.33 Análisis FFT de la tensión de línea AB prueba 1530 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

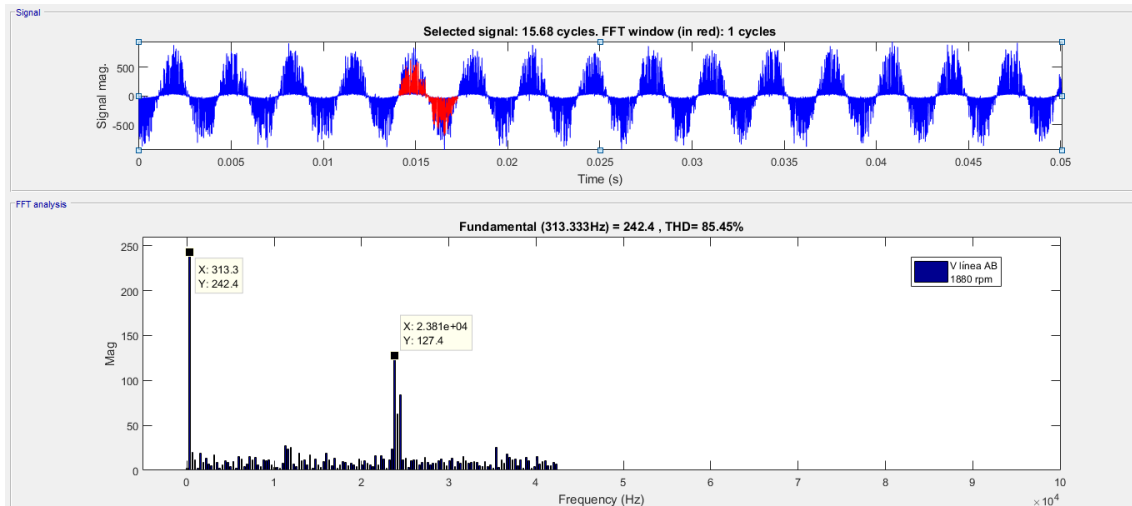


Figura B.34 Análisis FFT de la tensión de línea AB prueba 1880 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

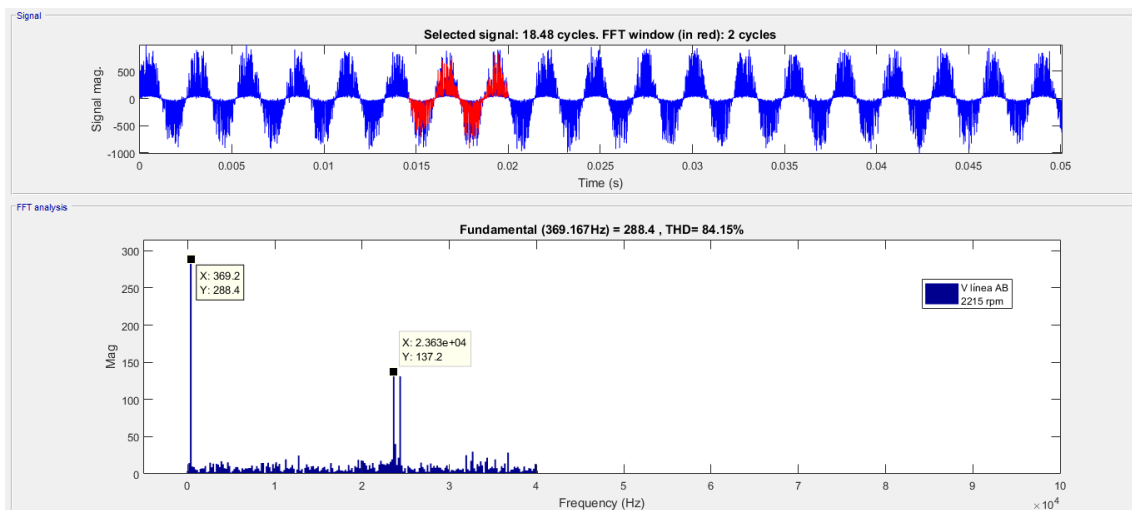


Figura B.35 Análisis FFT de la tensión de línea AB prueba 2215 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

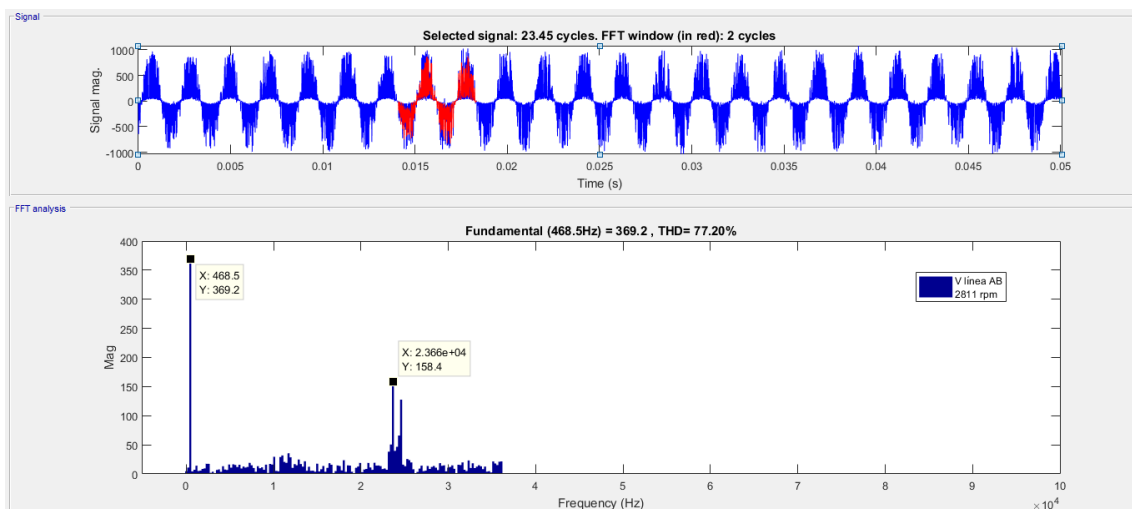


Figura B.36 Análisis FFT de la tensión de línea AB prueba 2811 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

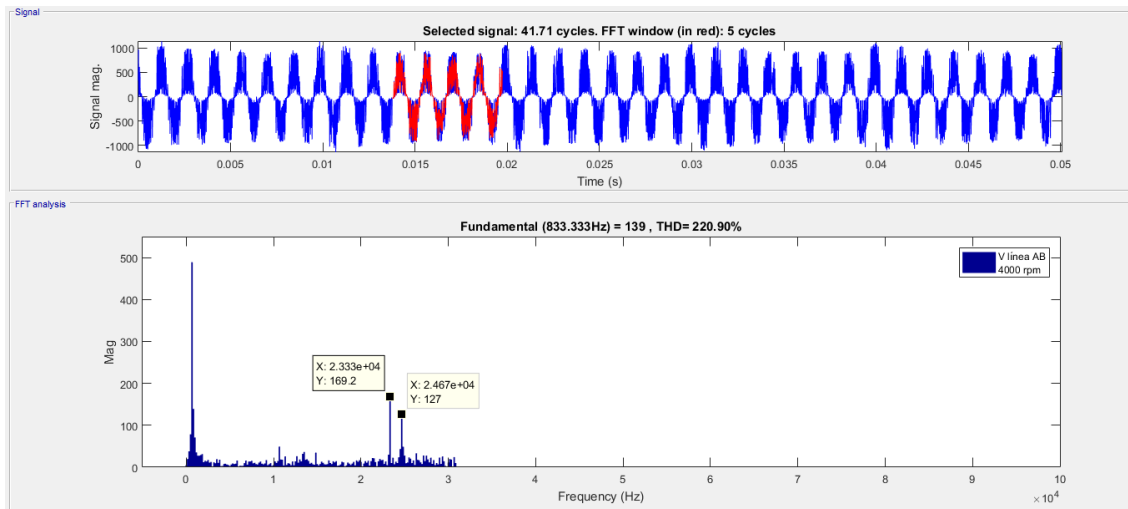


Figura B.37 Análisis FFT de la tensión de línea AB prueba 4000 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

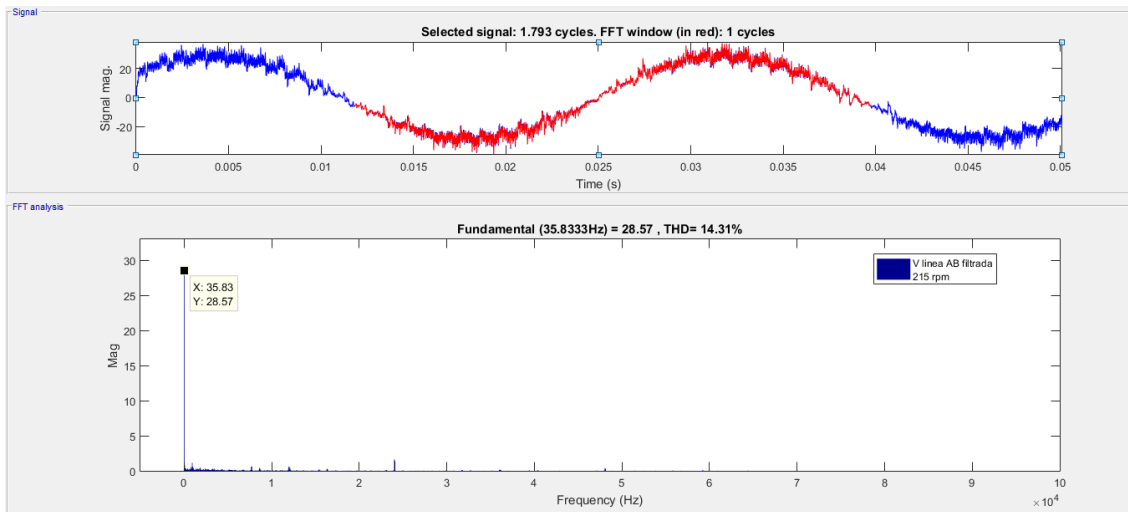


Figura B.38 Análisis FFT de la tensión de línea AB filtrada prueba 215 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

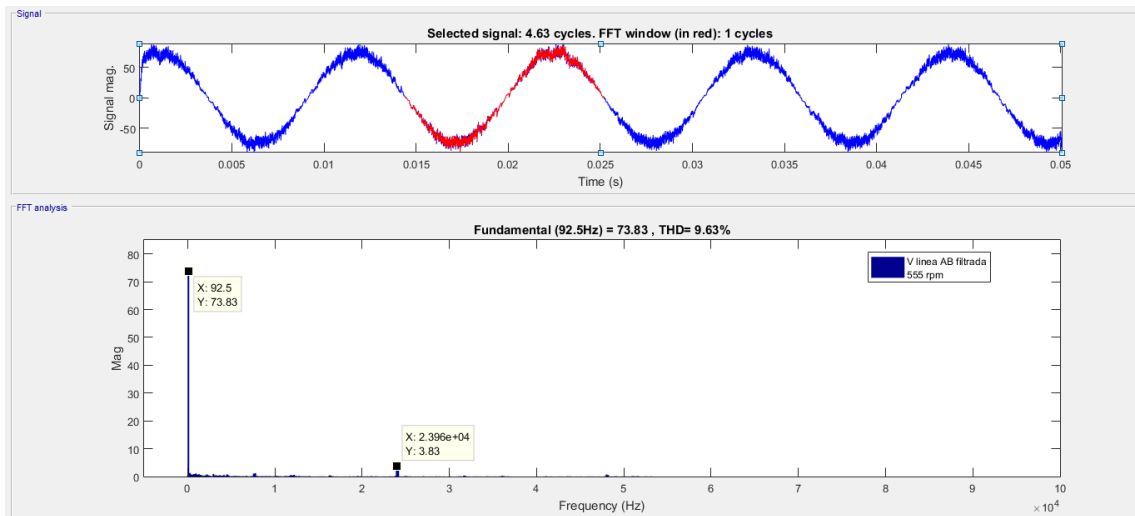


Figura B.39 Análisis FFT de la tensión de línea AB filtrada prueba 555 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

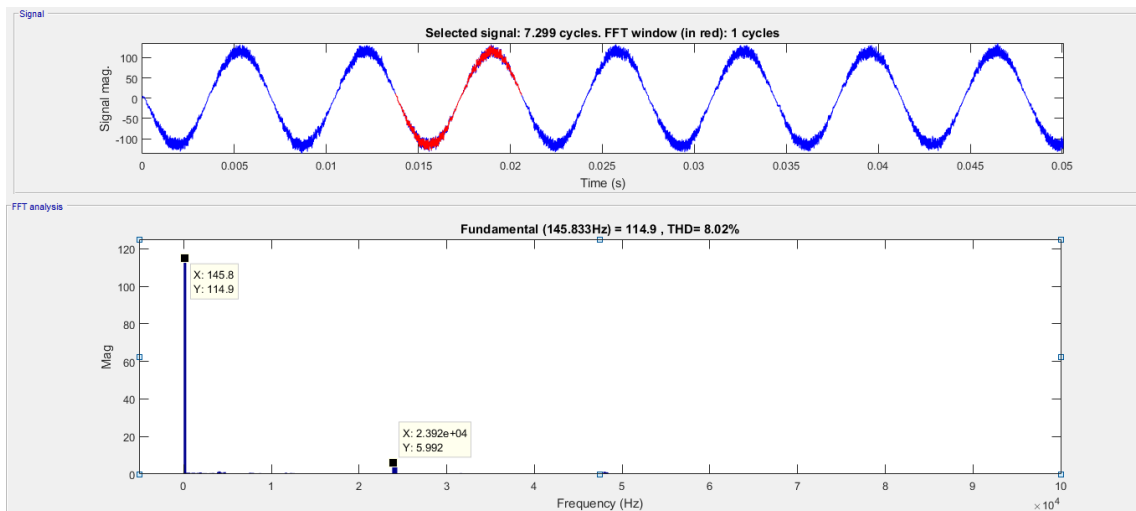


Figura B.40 Análisis FFT de la tensión de línea AB filtrada prueba 875 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

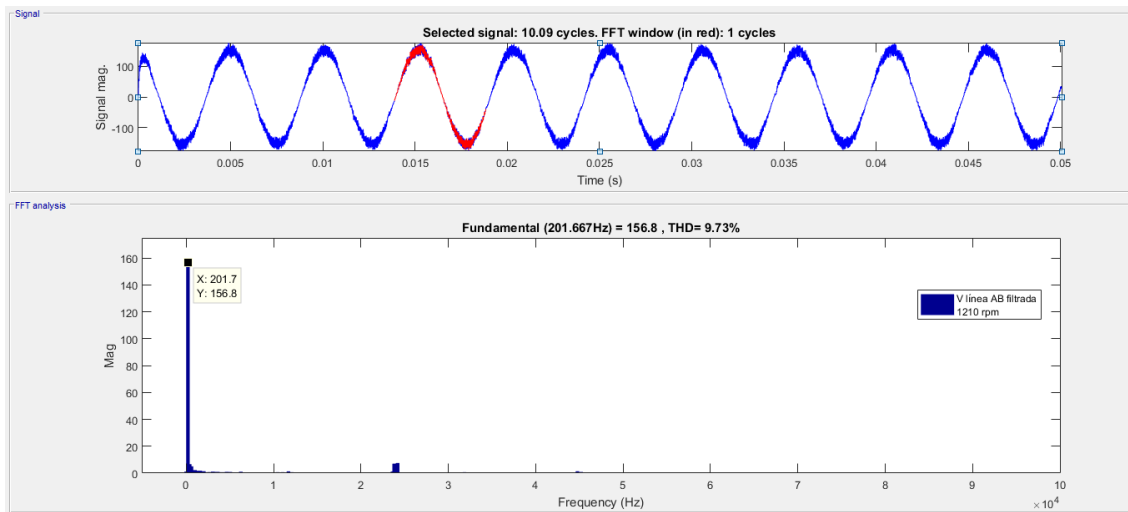


Figura B.41 Análisis FFT de la tensión de línea AB filtrada prueba 1210 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

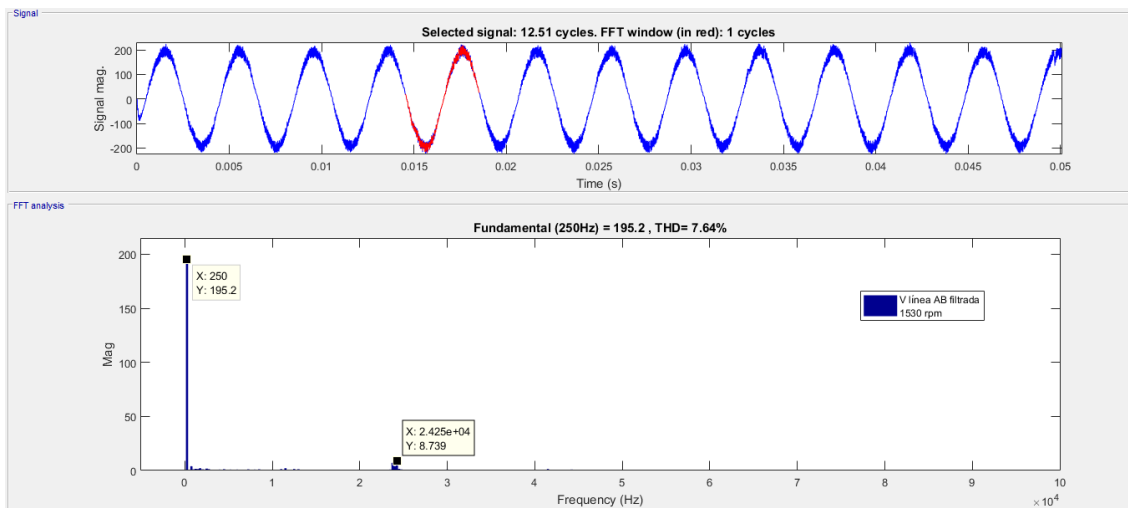


Figura B.42 Análisis FFT de la tensión de línea AB filtrada prueba 1530 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

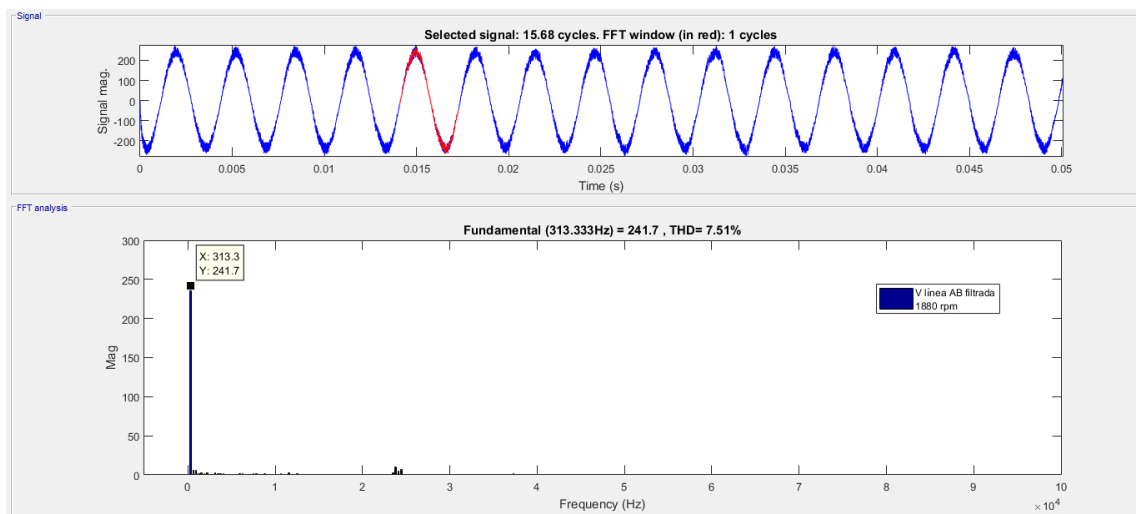


Figura B.43 Análisis FFT de la tensión de línea AB filtrada prueba 1880 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

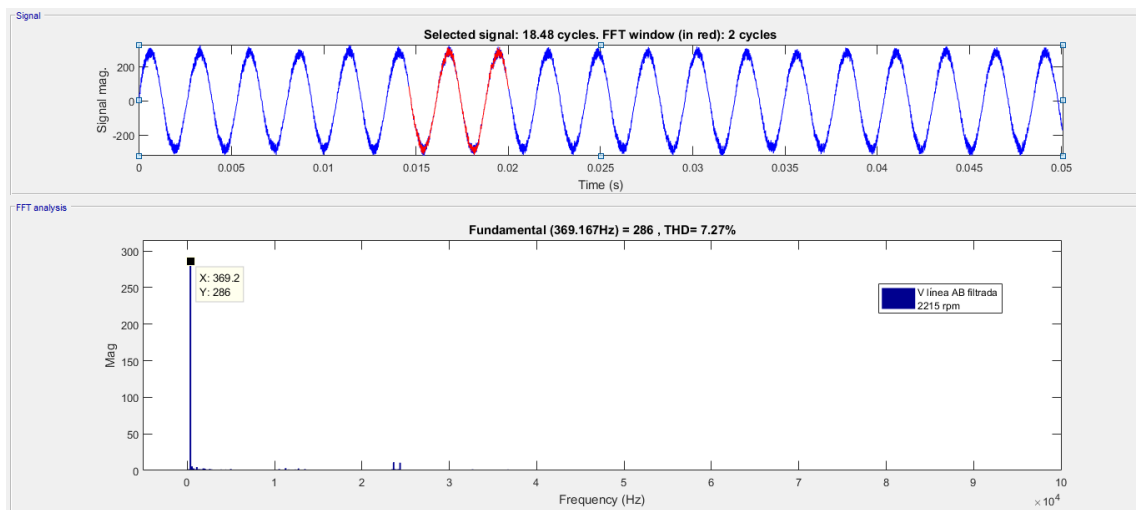


Figura B.44 Análisis FFT de la tensión de línea AB filtrada prueba 2215 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

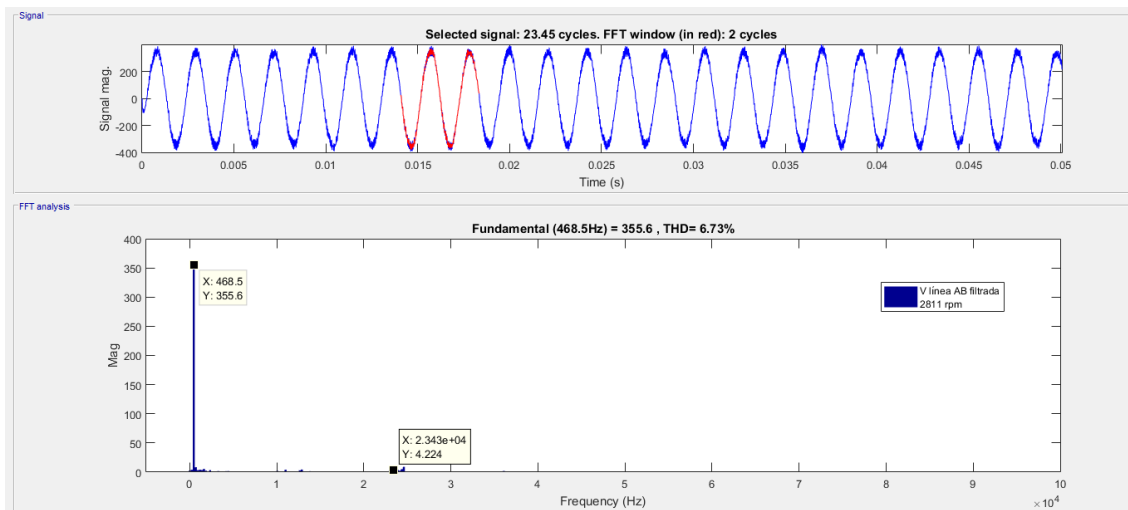


Figura B.45 Análisis FFT de la tensión de línea AB filtrada prueba 2811 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

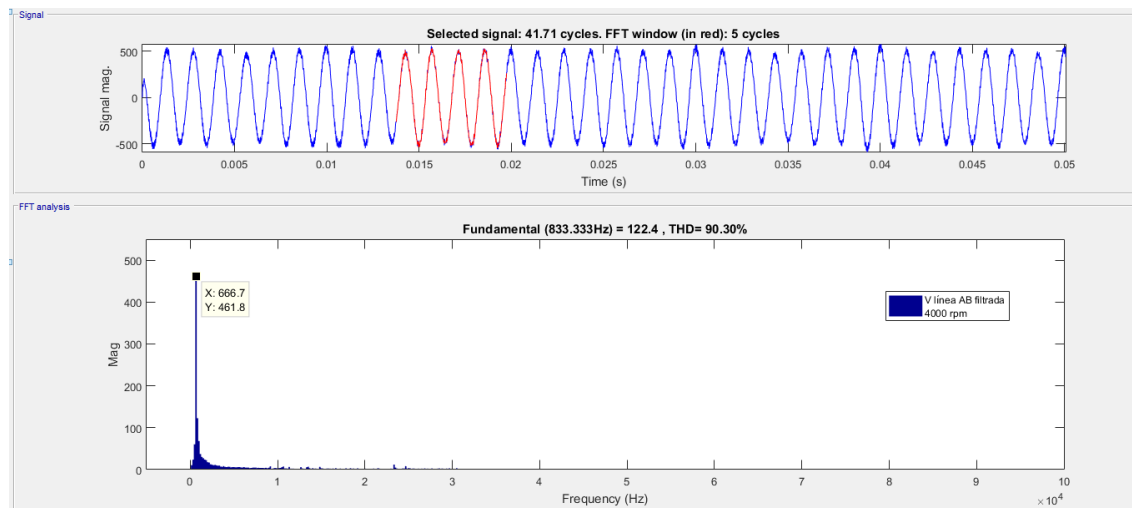


Figura B.46 Análisis FFT de la tensión de línea AB filtrada prueba 4000 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia.

Apéndice C

Gráficas del ensayo en carga tipo Acceleration. Representación temporal

- Intensidades de fase
- Intensidades filtradas a 12 kHz
- Tensiones de fase
- Tensiones de fase filtradas
- Tensiones de línea
- Tensiones de línea filtradas

C.1 Intensidades de fase A, B y C

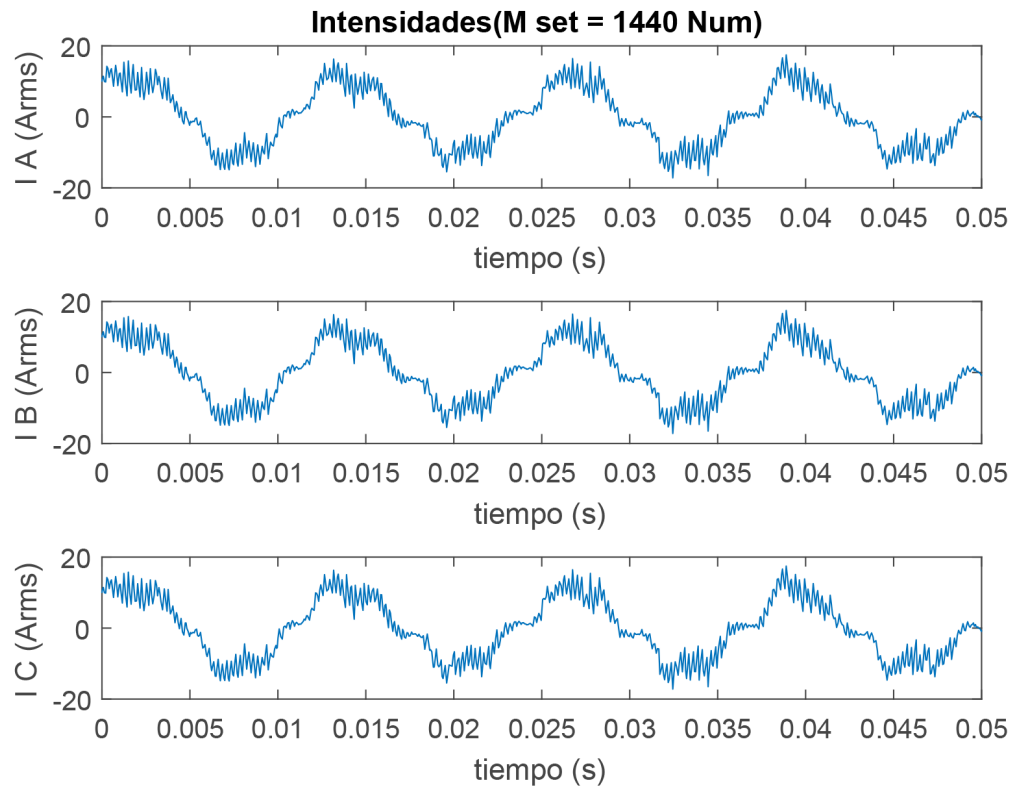


Figura C.1 Representación temporal intensidades de fase prueba 1440 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

C.2 Intensidades filtradas a 12 kHz

C.3 Tensiones de fase

C.4 Tensiones de línea

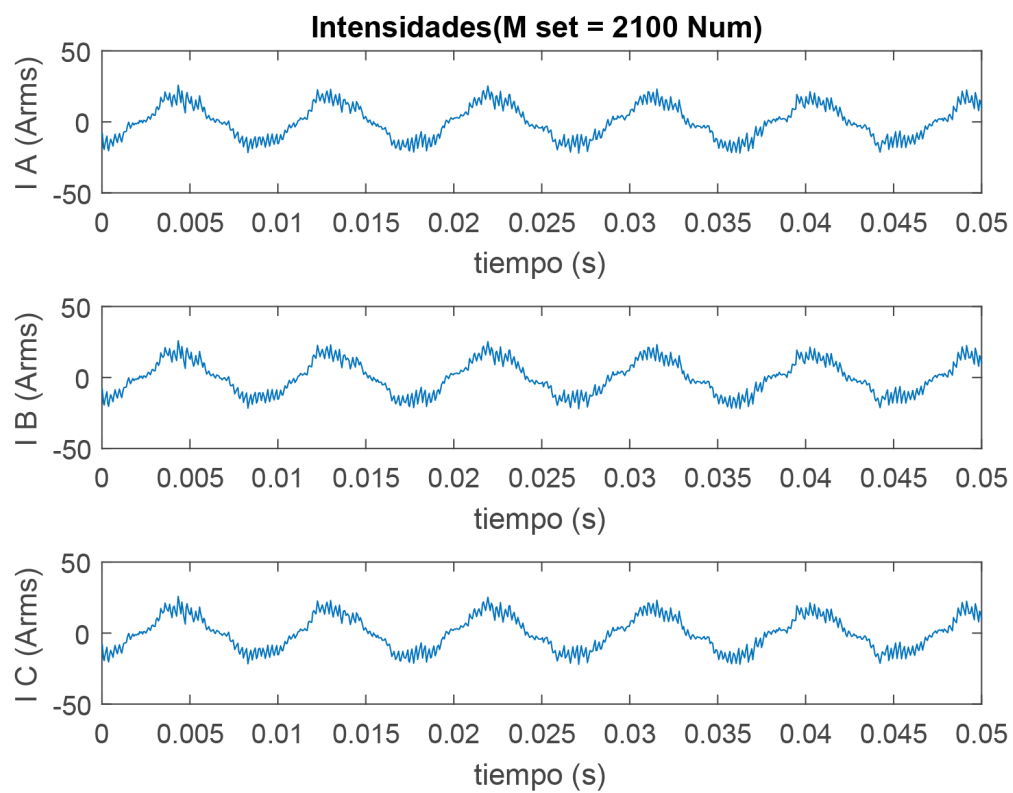


Figura C.2 Representación temporal intensidades de fas prueba 2100 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

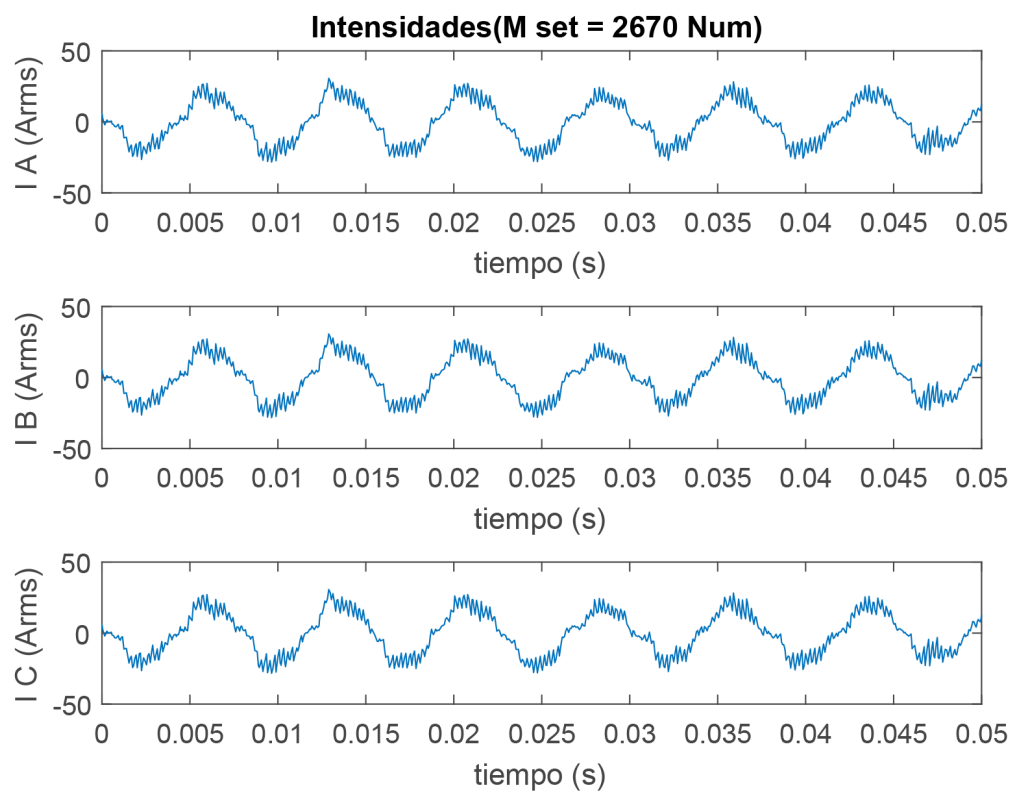


Figura C.3 Representación temporal intensidades de fase prueba 2670 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

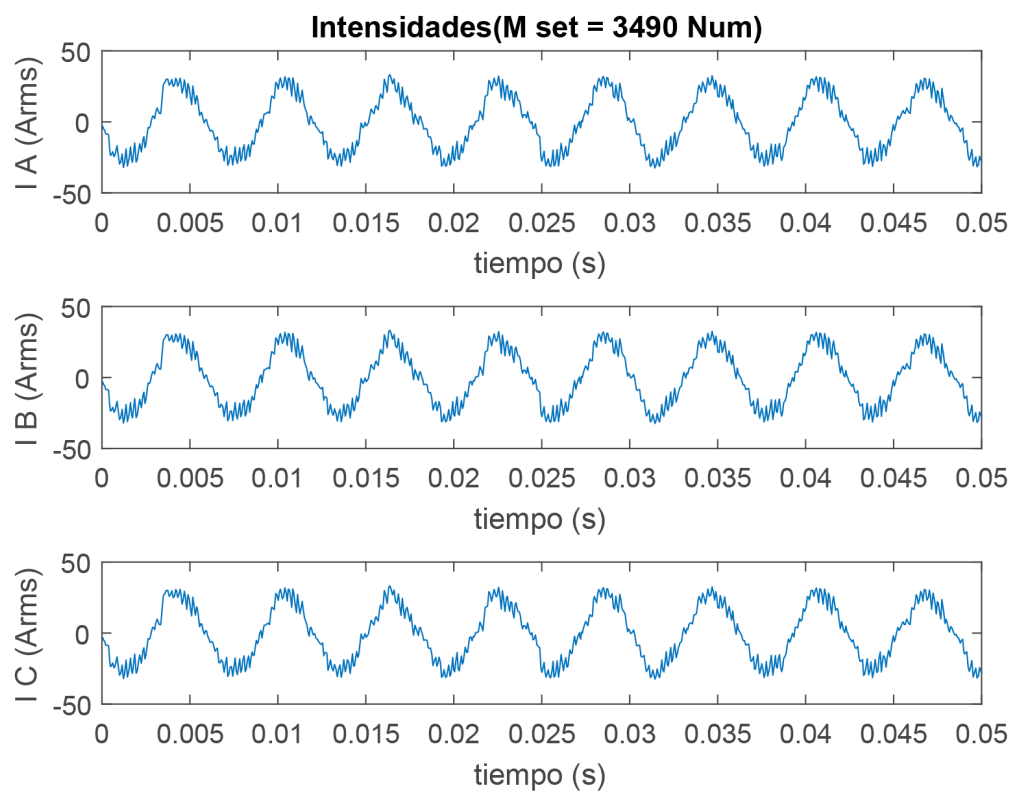


Figura C.4 Representación temporal intensidades de fase prueba 3490 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

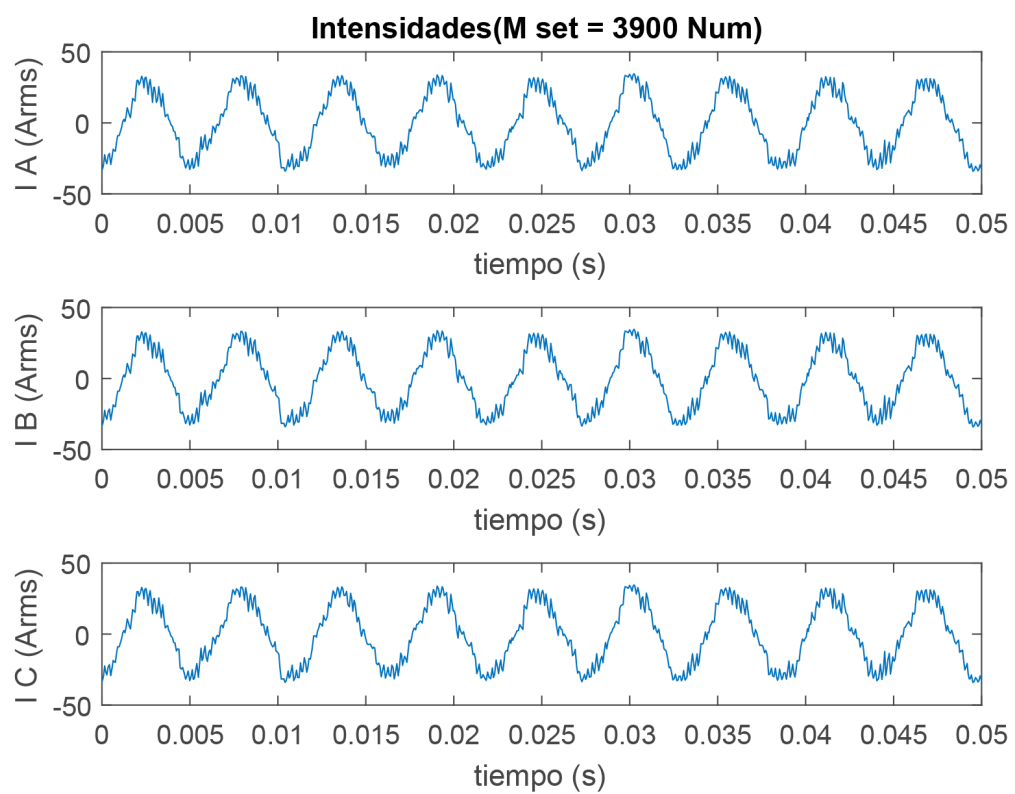


Figura C.5 Representación temporal intensidades prueba 3900 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

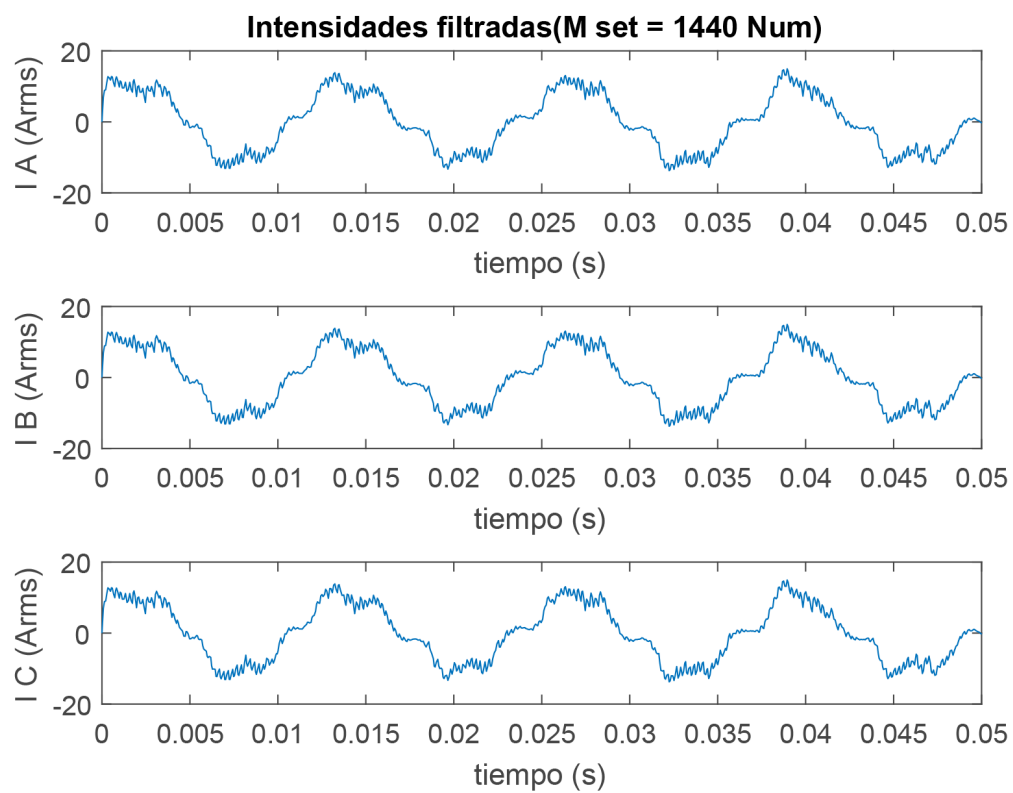


Figura C.6 Representación temporal intensidades filtradas prueba 1440 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

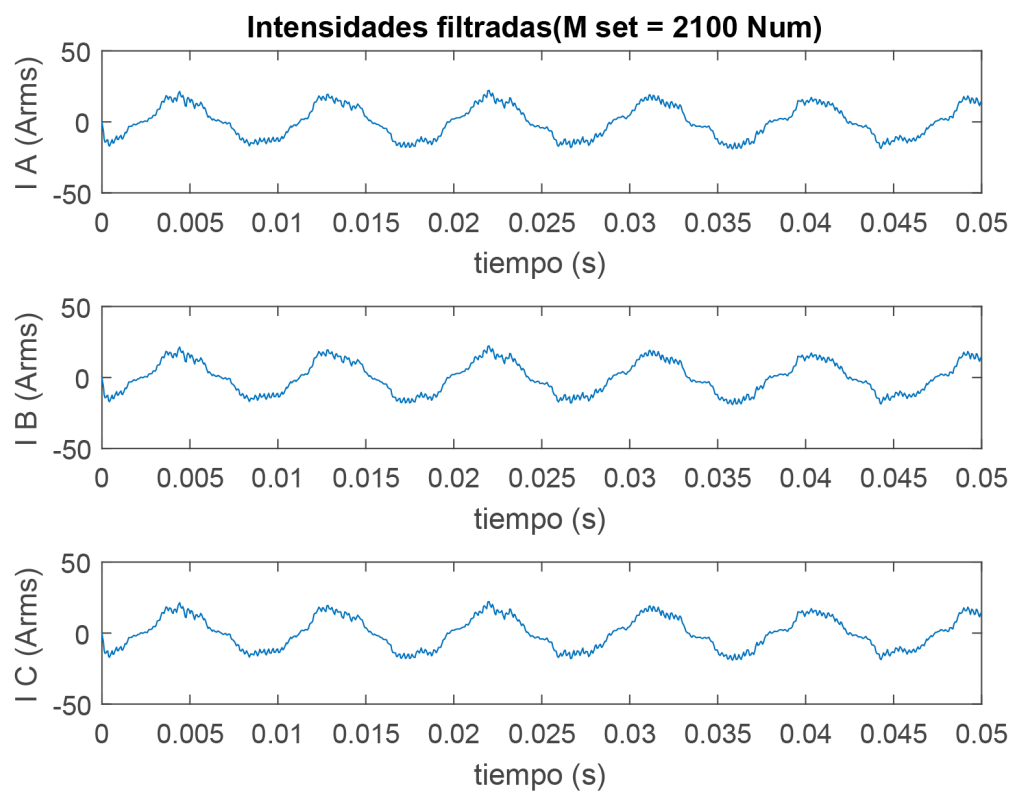


Figura C.7 Representación temporal intensidades filtradas prueba 2100 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

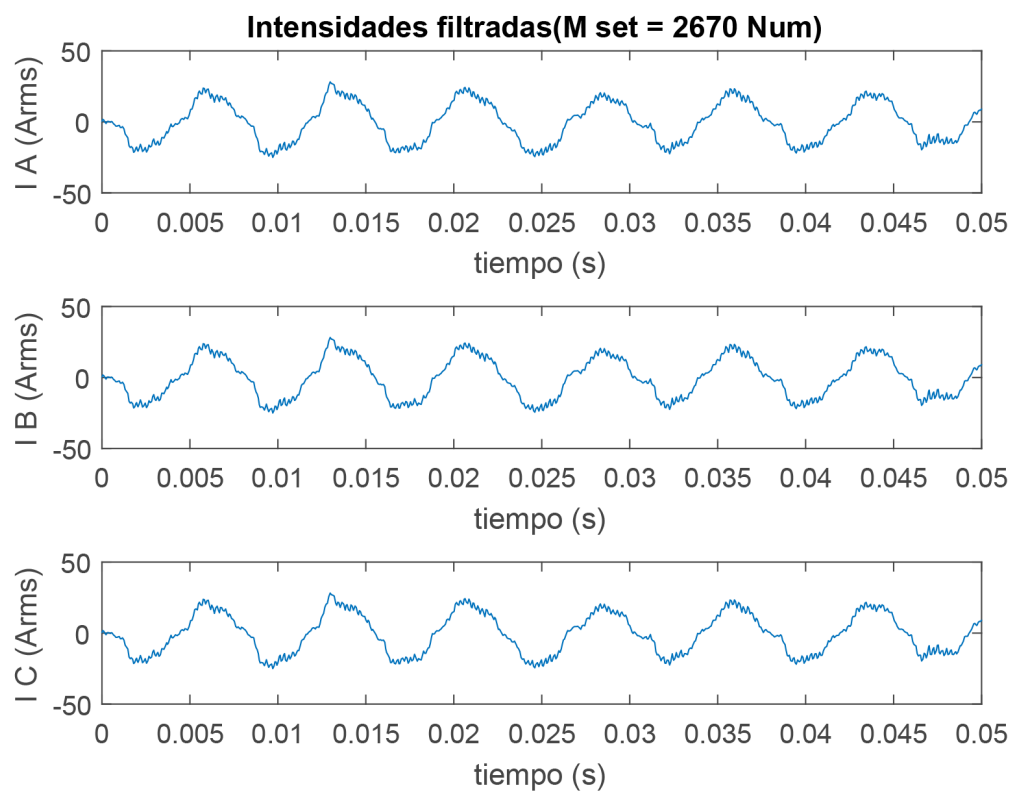


Figura C.8 Representación temporal intensidades filtradas prueba 2670 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

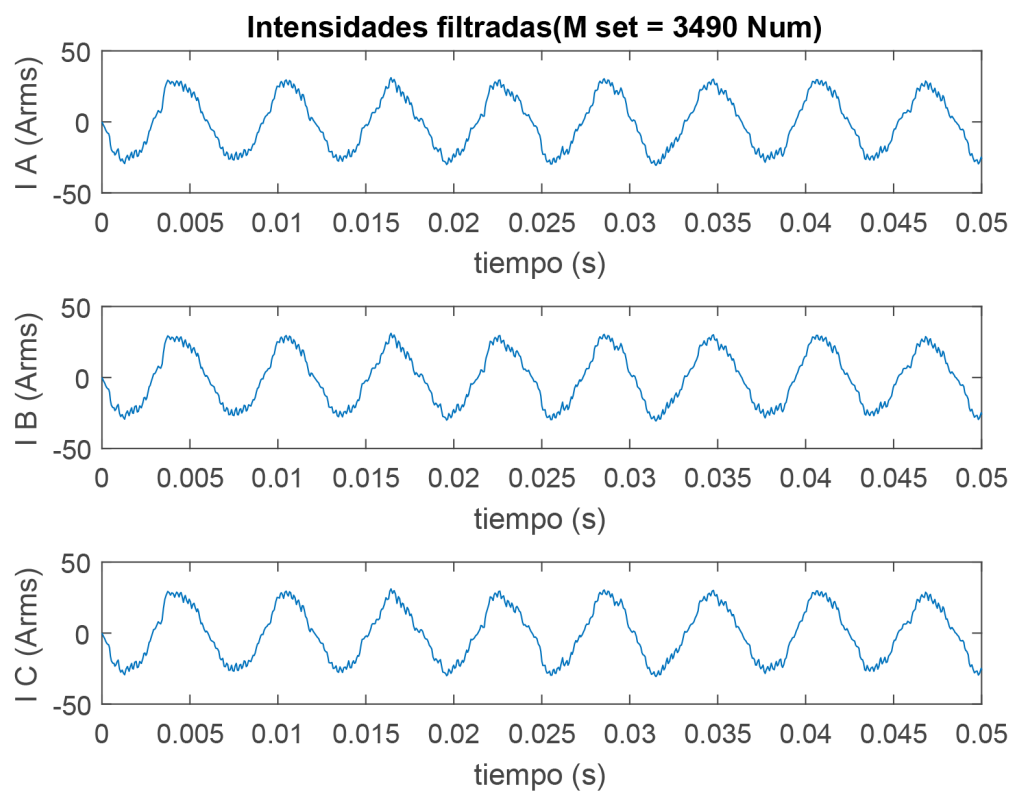


Figura C.9 Representación temporal intensidades filtradas prueba 3490 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

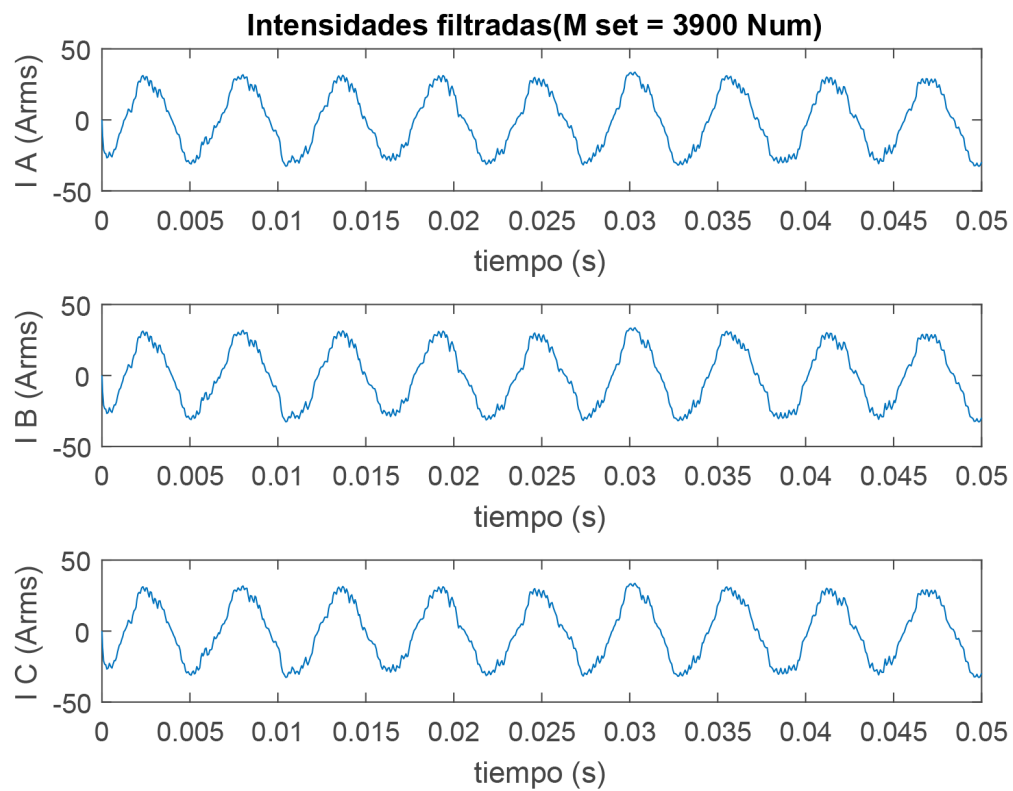


Figura C.10 Representación temporal intensidades filtradas prueba 3900 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

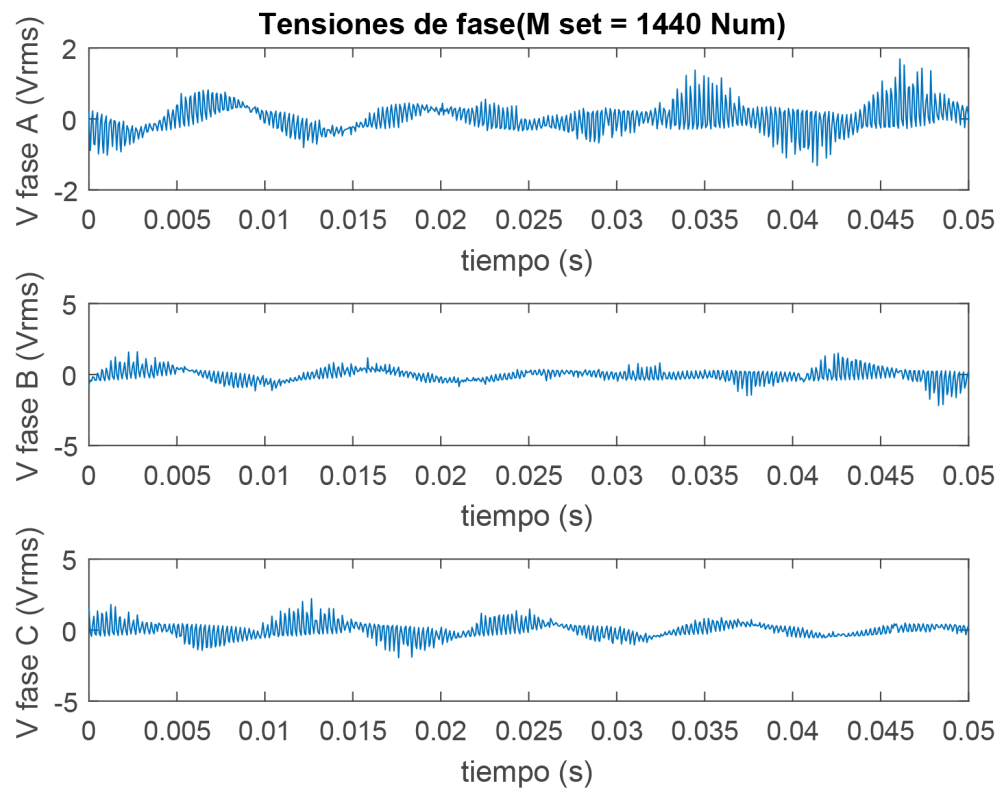


Figura C.11 Representación temporal tensiones de fase prueba 1440 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

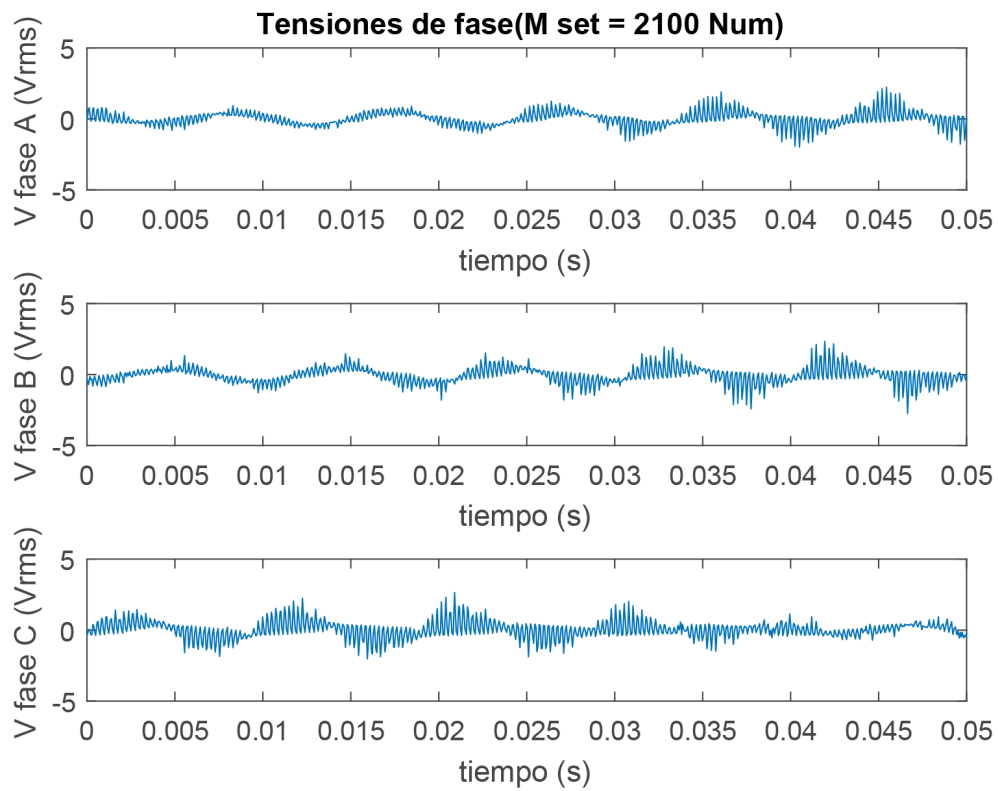


Figura C.12 Representación temporal tensiones de fase prueba 2100 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

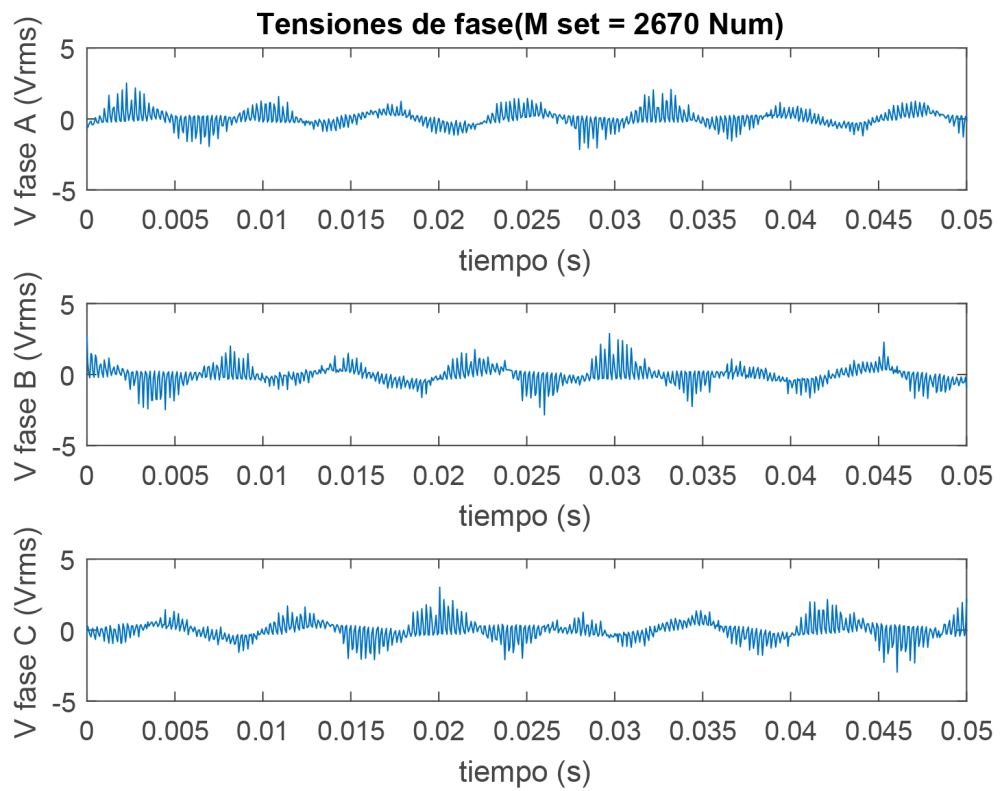


Figura C.13 Representación temporal tensiones de fase prueba 2670 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

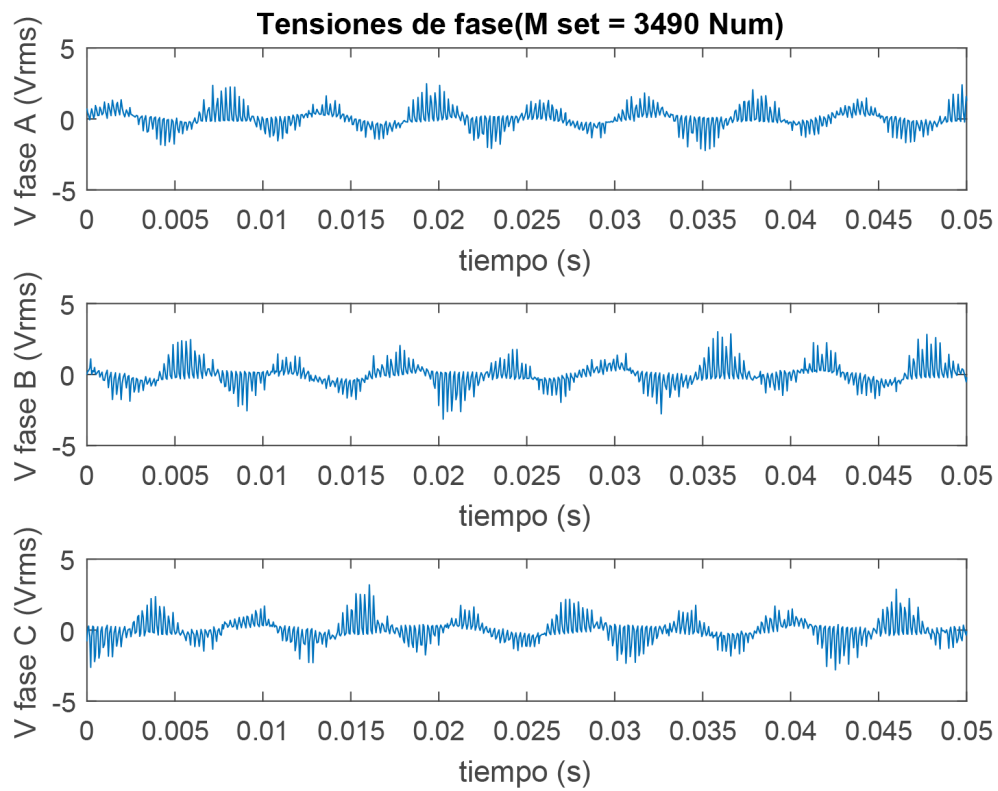


Figura C.14 Representación temporal tensiones de fase prueba 3490 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

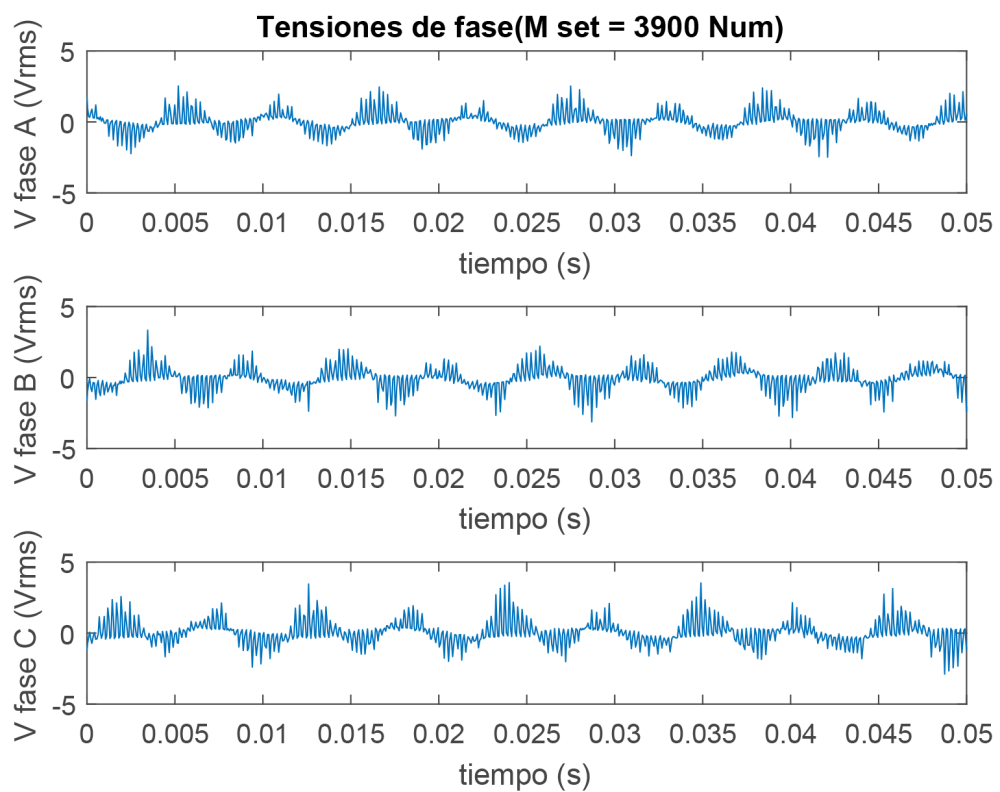


Figura C.15 Representación temporal tensiones de fase prueba 3900 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

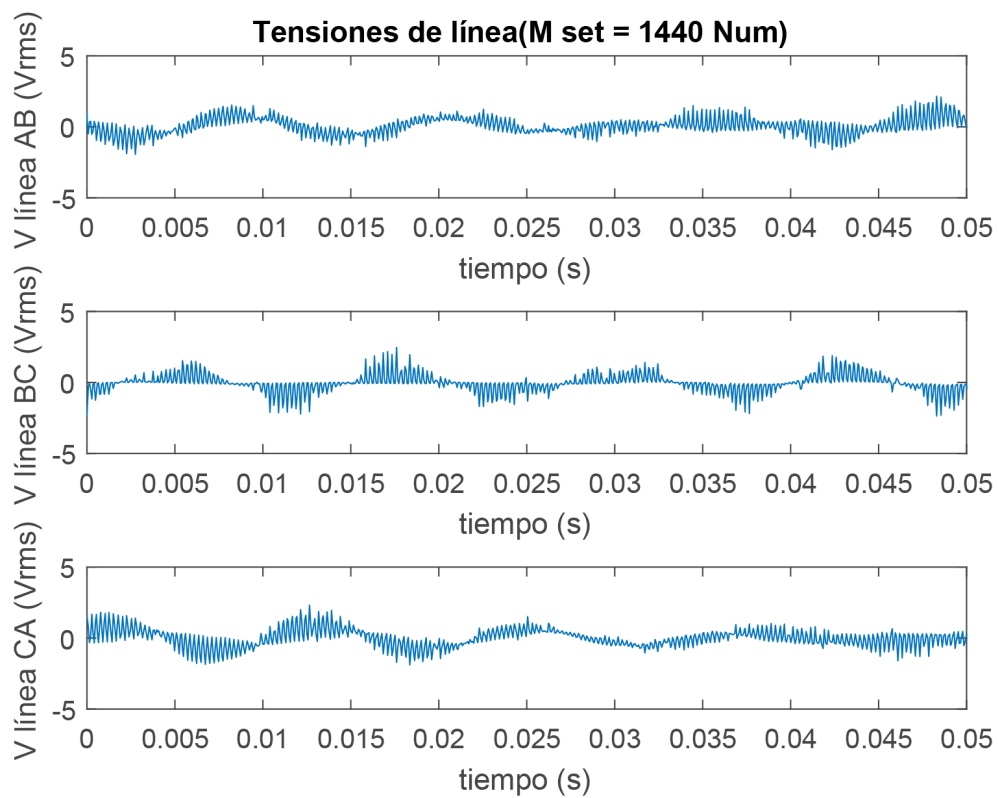


Figura C.16 Representación temporal tensiones línea prueba 1440 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

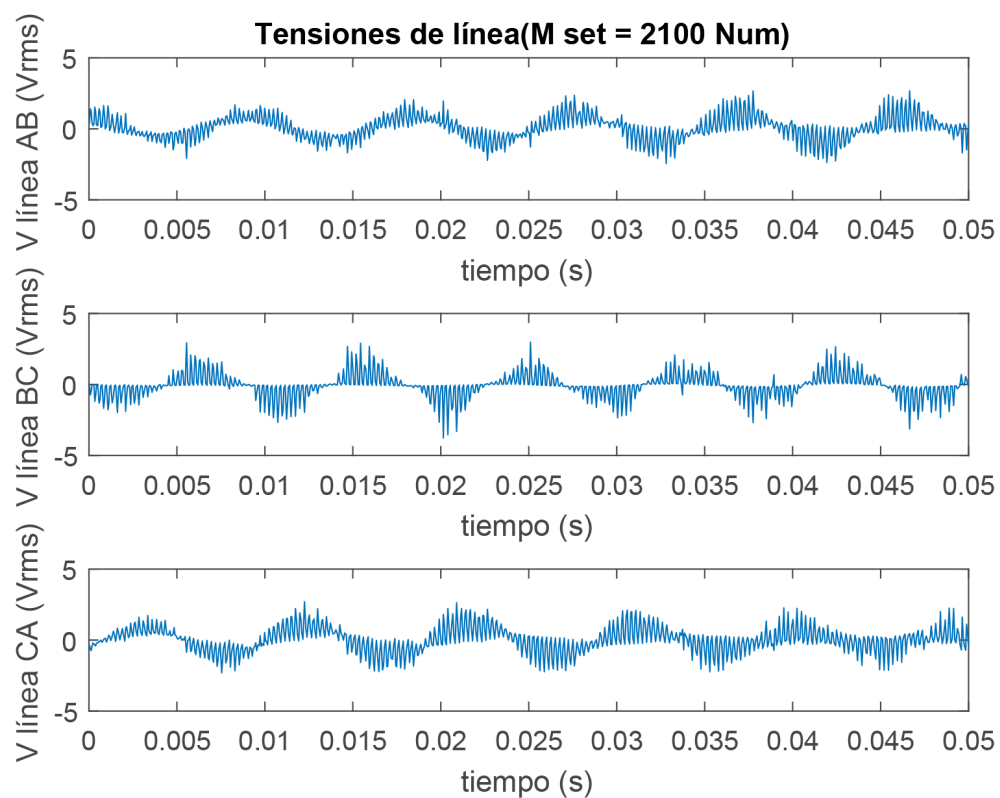


Figura C.17 Representación temporal tensiones línea prueba 2100 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

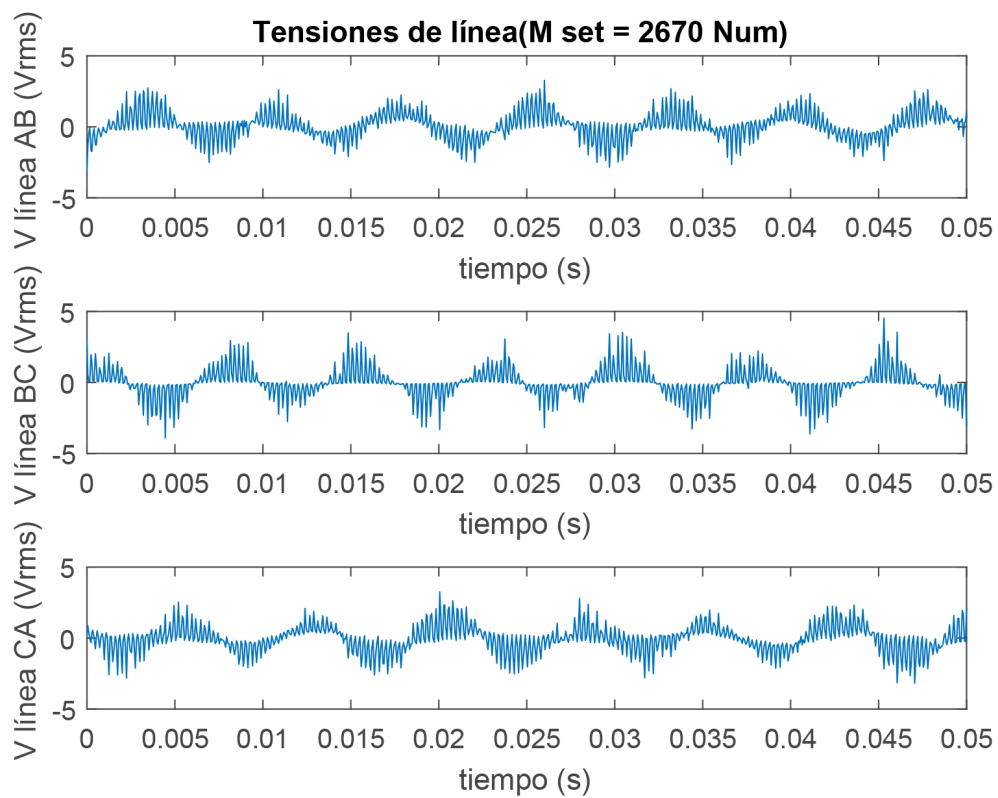


Figura C.18 Representación temporal tensiones línea prueba 2670 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

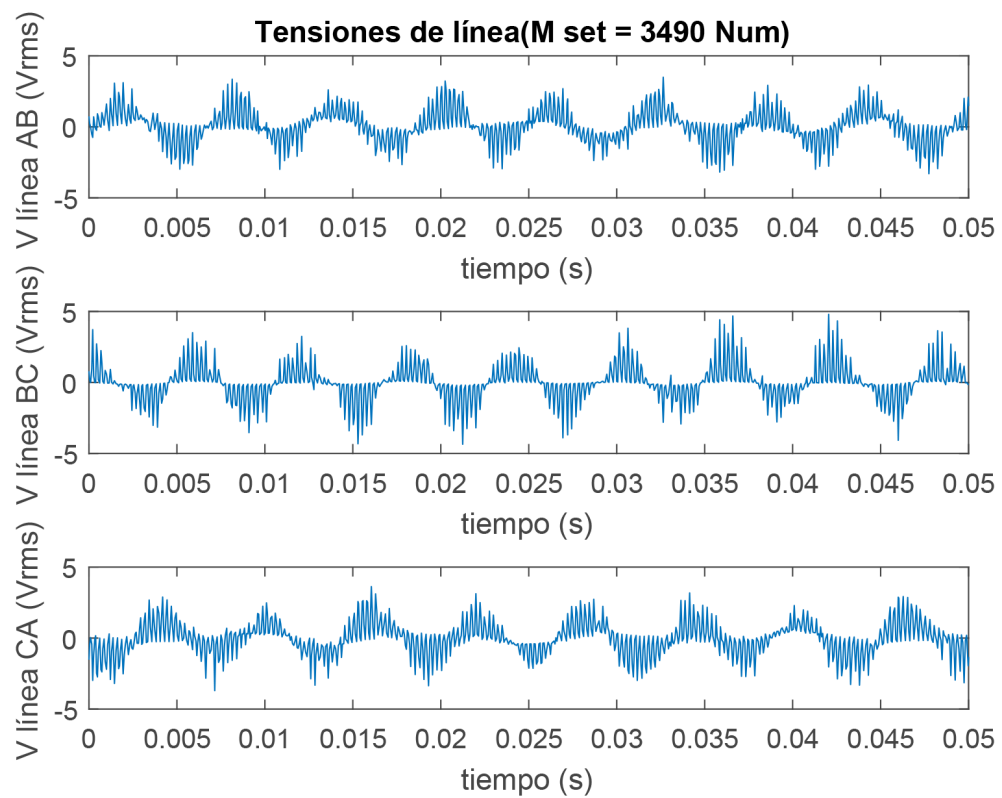


Figura C.19 Representación temporal tensiones línea prueba 3490 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

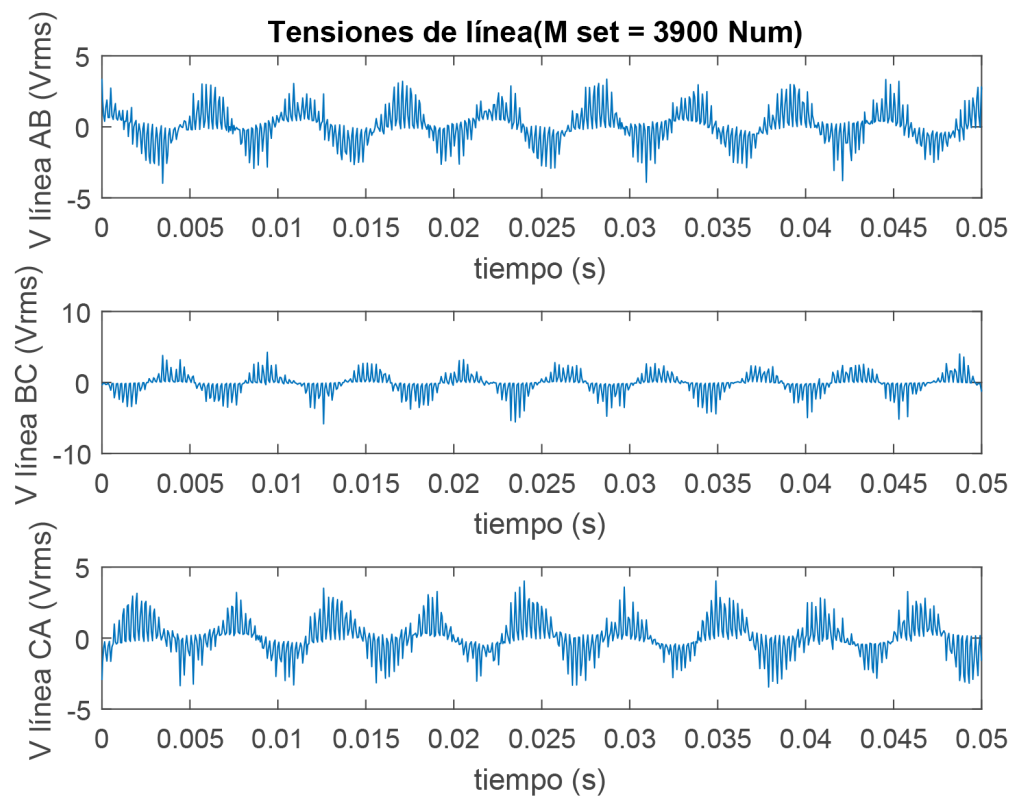


Figura C.20 Representación temporal tensiones línea prueba 3900 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

Apéndice D

Gráficas del ensayo en carga tipo Acceleration. Análisis en frecuencia

- Análisis FFT de las intensidades de fase
- Análisis FFT de las tensiones de fase
- Análisis FFT de las tensiones de línea

D.1 Análisis FFT de las intensidades de fase

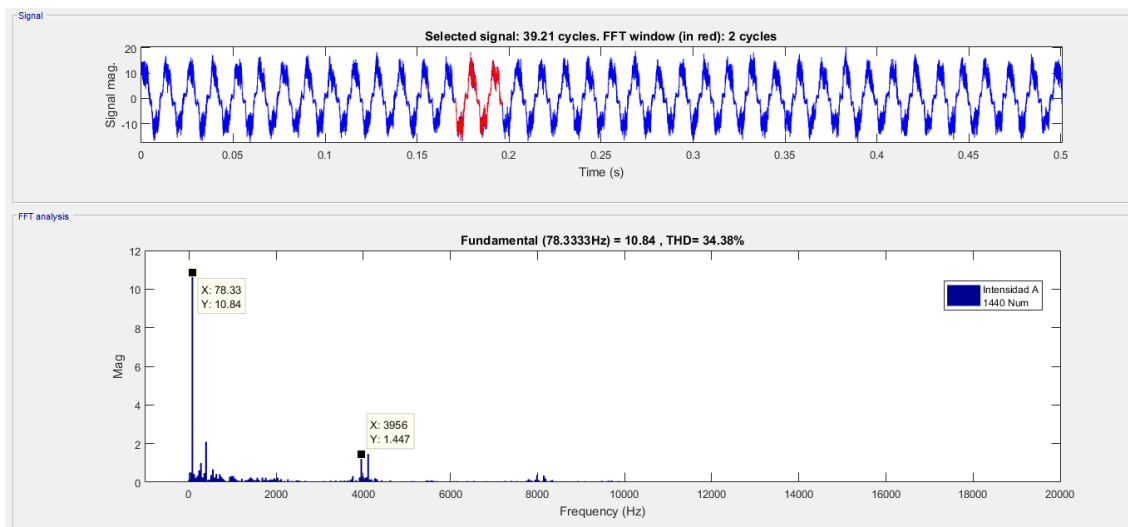


Figura D.1 Análisis en frecuencia de las intensidades prueba 1440 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

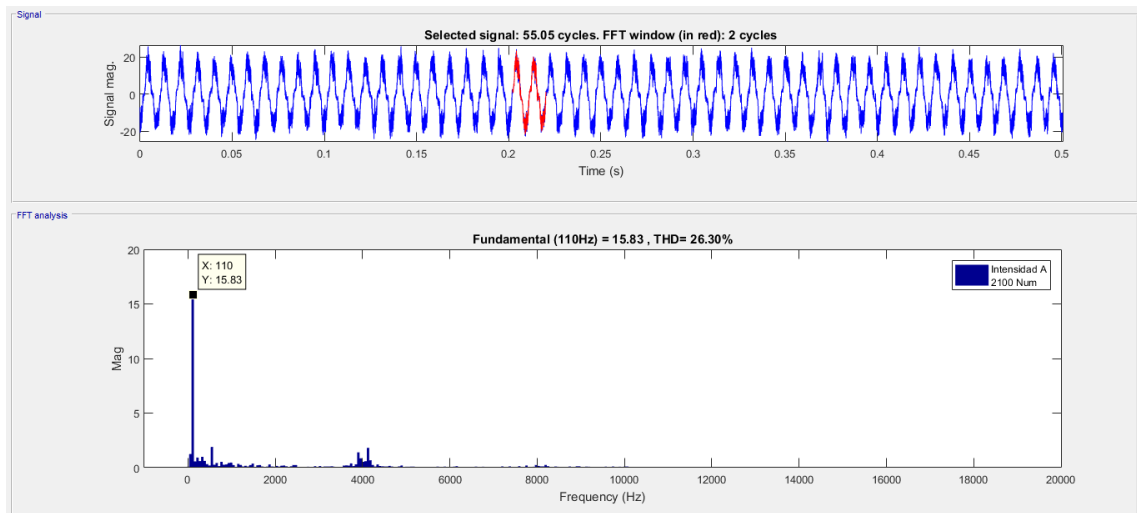


Figura D.2 Análisis en frecuencia de las intensidades prueba 2100 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

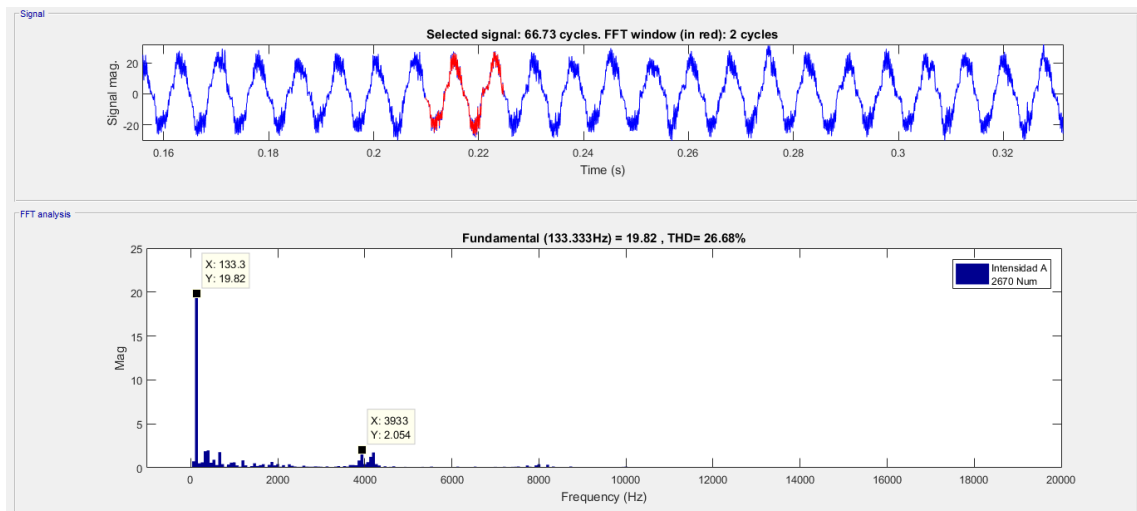


Figura D.3 Análisis en frecuencia de las intensidades prueba 2670 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

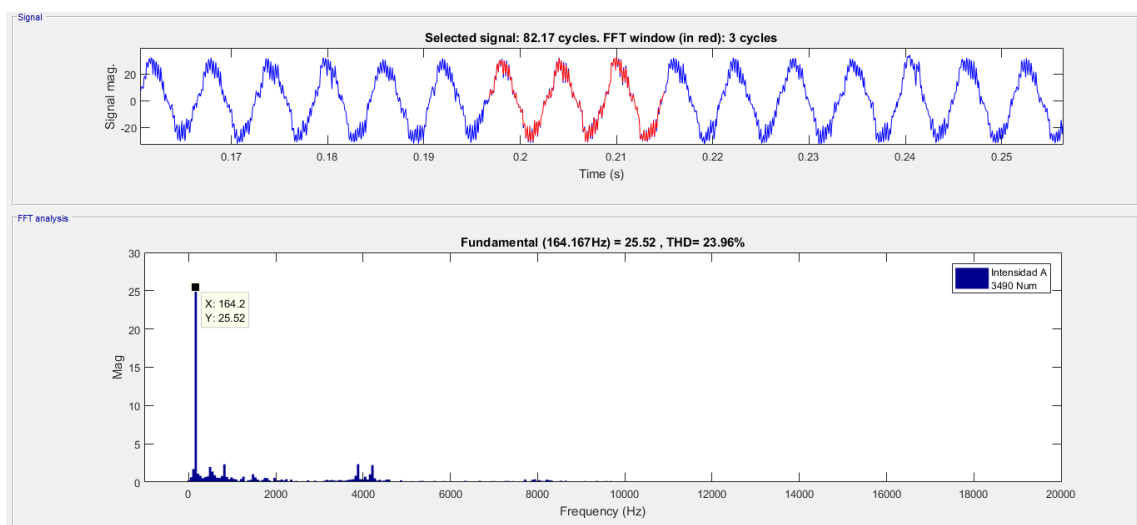


Figura D.4 Análisis en frecuencia de las intensidades prueba 3490 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

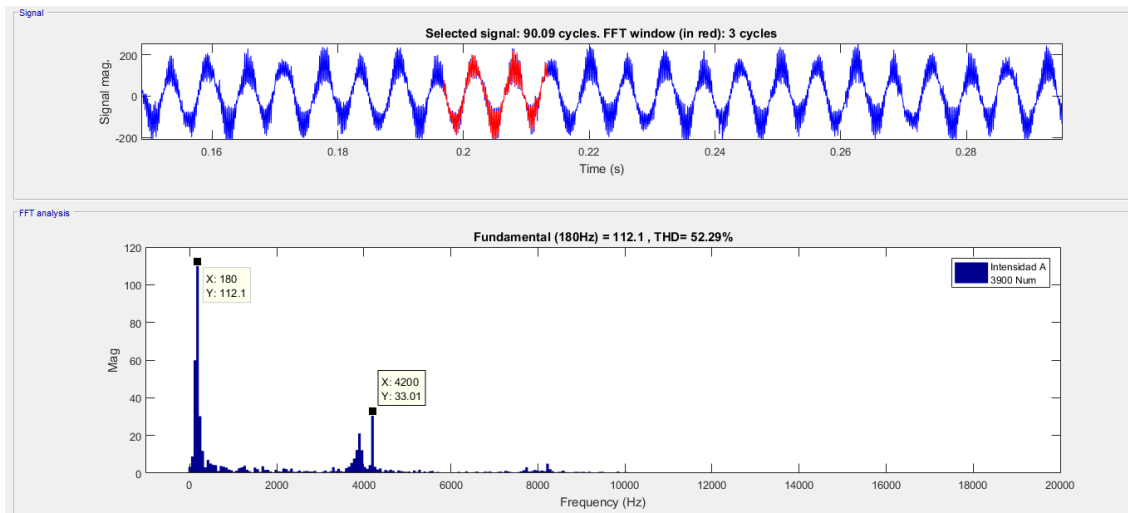


Figura D.5 Análisis en frecuencia de las intensidades prueba 3900 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

D.2 Análisis FFT de las tensiones de fase

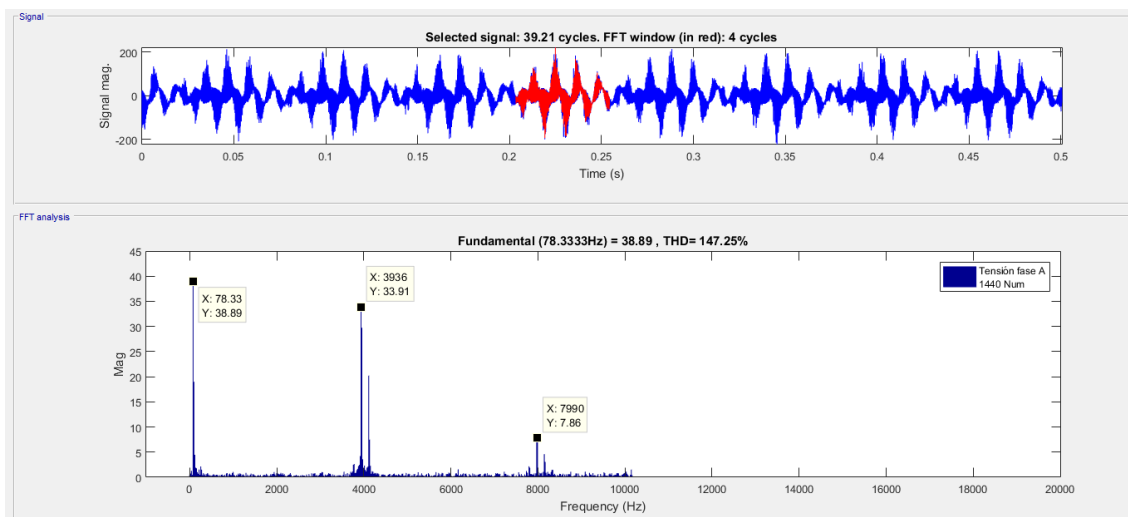


Figura D.6 Análisis en frecuencia de las tensiones de fase prueba 1440 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

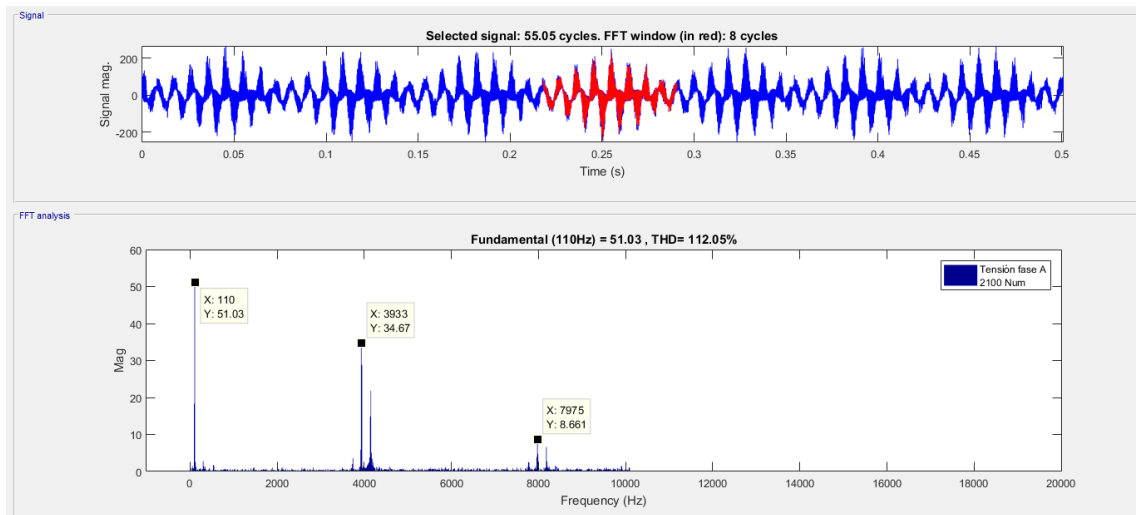


Figura D.7 Análisis en frecuencia de las tensiones de fase prueba 2100 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

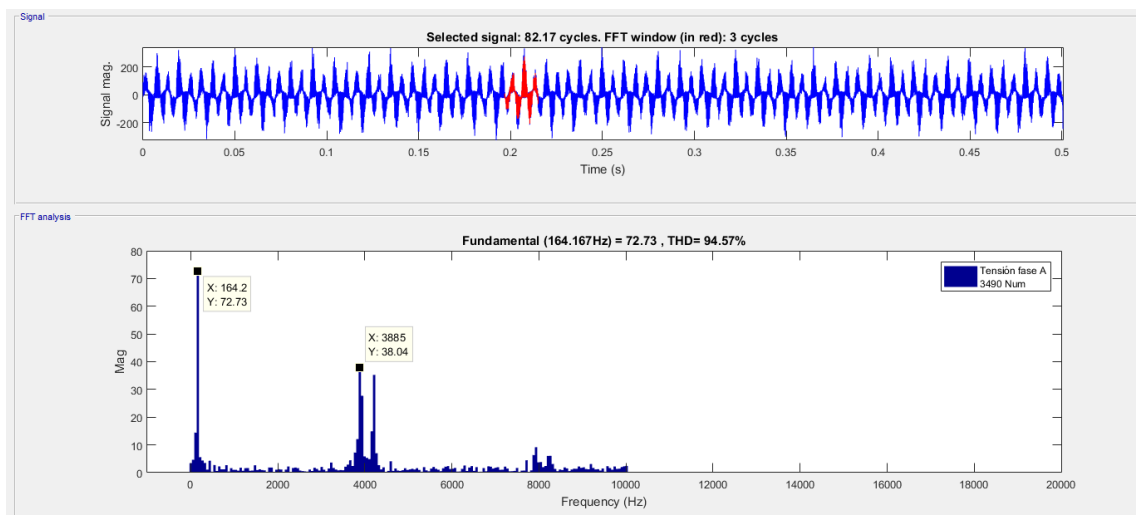


Figura D.8 Análisis en frecuencia de las tensiones de fase prueba 2490 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

D.3 Análisis FFT de las tensiones de línea

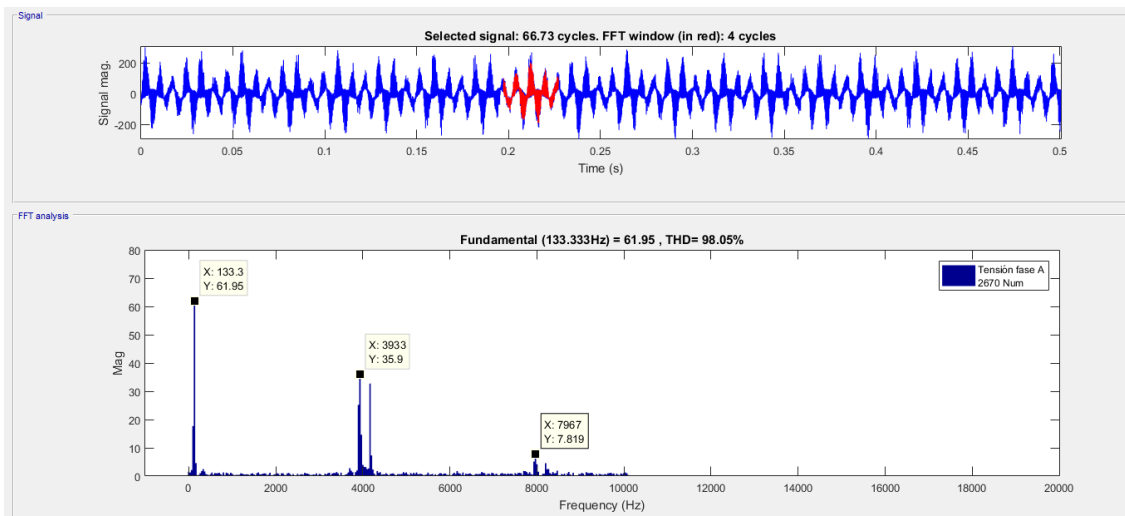


Figura D.9 Análisis en frecuencia de las tensiones de fase prueba 2670 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

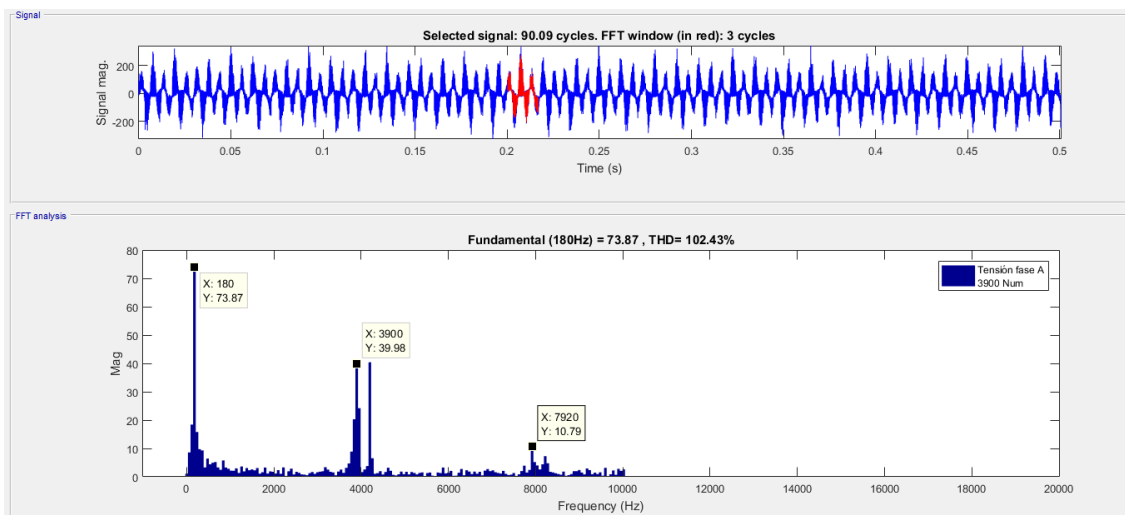


Figura D.10 Análisis en frecuencia de las tensiones de fase prueba 3900 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

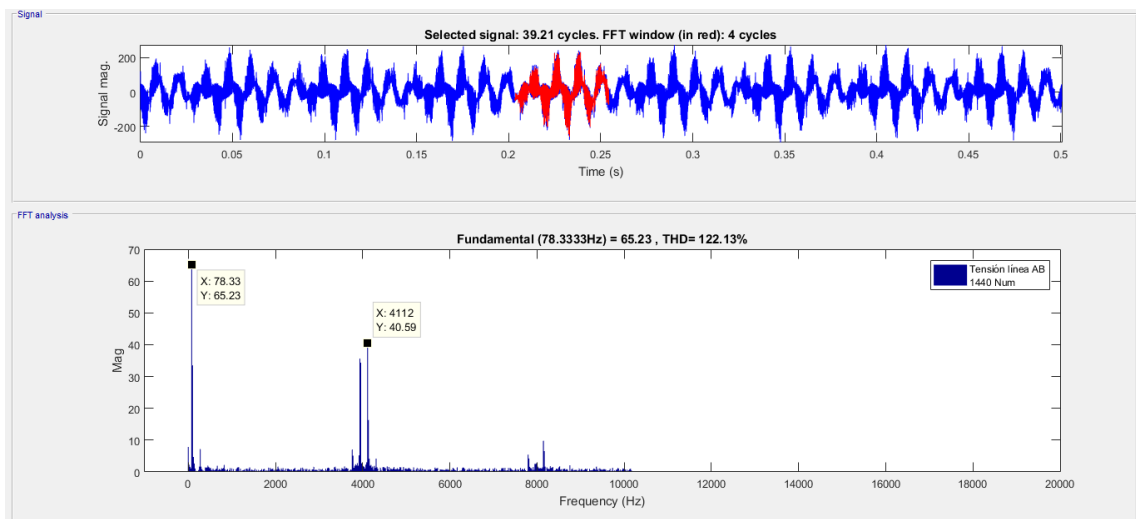


Figura D.11 Análisis en frecuencia de las tensiones de línea prueba 1440 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

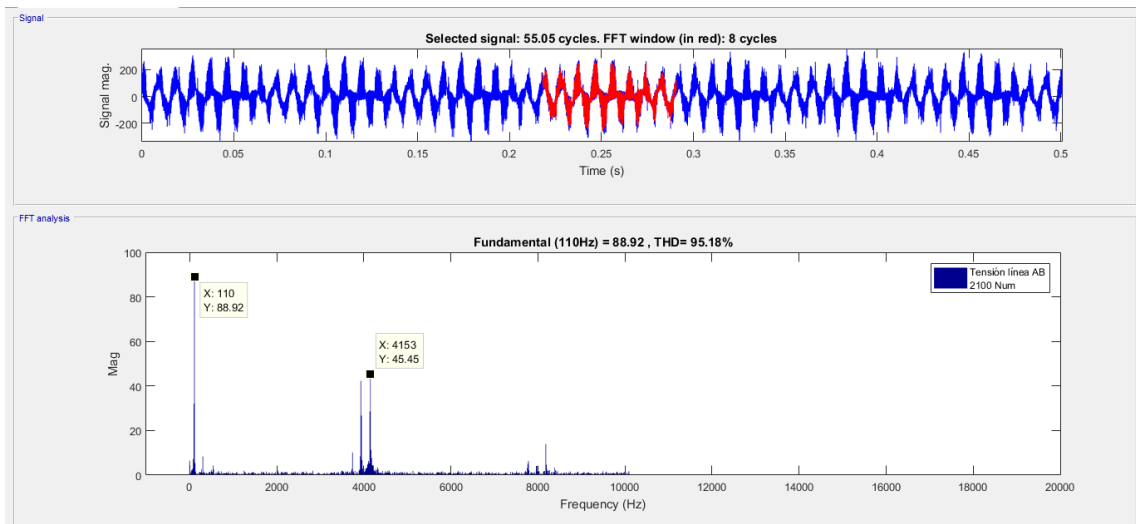


Figura D.12 Análisis en frecuencia de las tensiones de línea prueba 2100 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

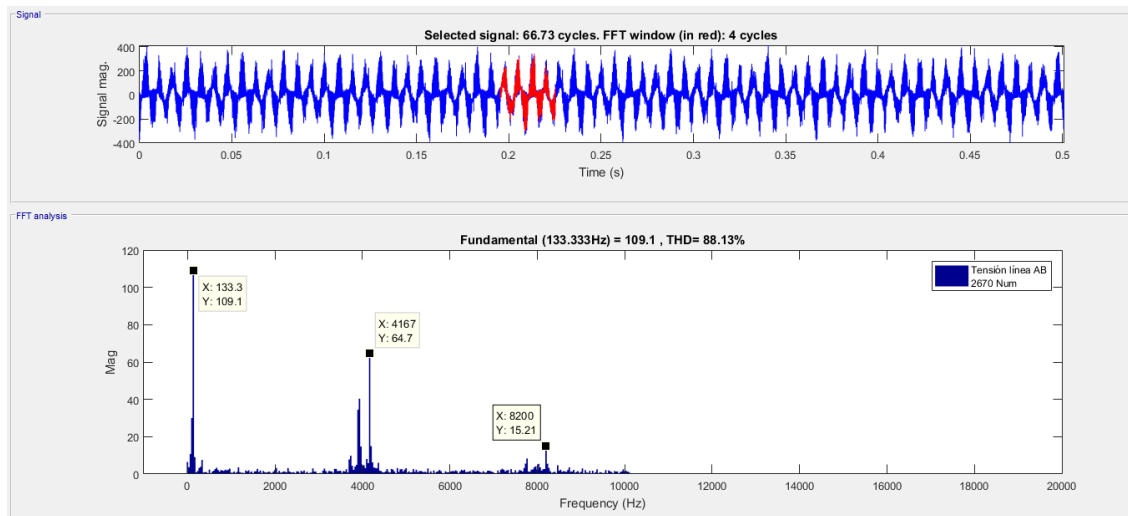


Figura D.13 Análisis en frecuencia de las tensiones de línea prueba 2670 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

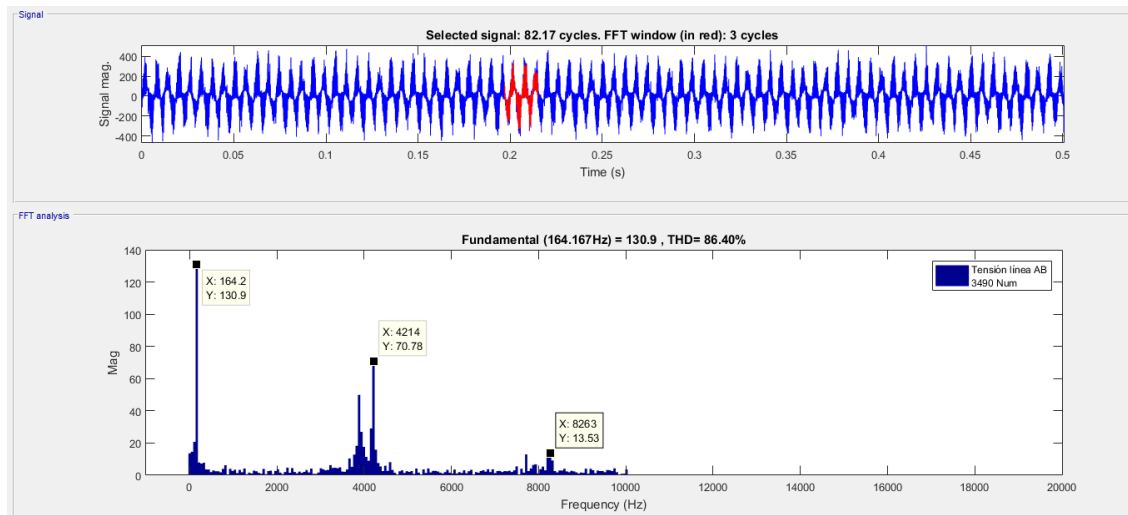


Figura D.14 Análisis en frecuencia de las tensiones de línea prueba 3490 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

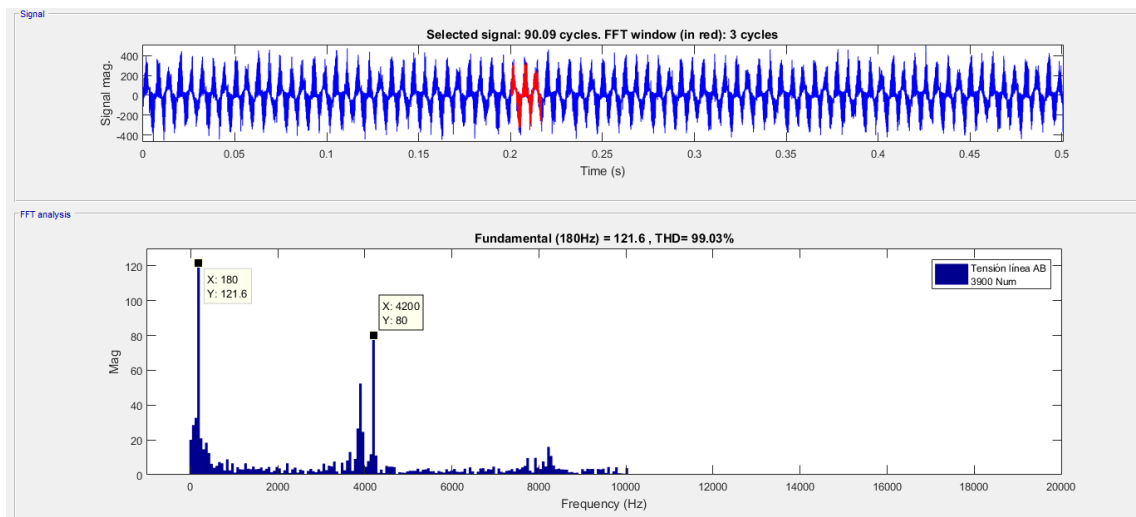


Figura D.15 Análisis en frecuencia de las tensiones de línea prueba 3900 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia.

Índice de Figuras

1.1	Asistentes de ARUS a FSG posando junto con el ART-19e (izquierda) y el ART-19c (derecha) en la foto oficial en el circuito del Hockenheimring. Fuente: propia	2
1.2	Miembros del equipo, amigos, en mitad de la inspección técnica de la batería en Montmeló que finalmente sería superada . Fuente: Redes sociales de FSG	3
1.3	Equipos participantes en FSG 2019 en la foto oficial en el circuito de Hockenheim. Fuente: Redes sociales de FSG	4
1.4	Miembros de ARUS en la prueba estática del Design junto al ART-19e. Fuente: propia	5
1.5	Stack de la nueva batería del ART-19e y diferentes detalles de la estructura de metacrilato sobre la que yacen los BMS esclavos También se muestra un stack en proceso de ser ensamblado. Fuente: Propia	6
1.6	Plano lateral del ART-19e. Fuente: Propia	6
1.7	Tren eléctrico de potencia del ART-19e. Fuente: propia	7
1.8	El ART-18c siendo puesto a prueba en un banco de rodillos. Fuente: Propia	7
1.9	Topología típica de los bancos de ensayo basados en dinamómetros. Fuente: [16]	8
1.10	Arquitectura más compleja implementando un HIL con una red CAN y dos ejes mecánicos en funcionamiento. Ejemplo de medición del mapa de eficiencia motor. Fuente: [16]	9
1.11	Esquema multifilar al detalle del sistema eléctrico del banco de ensayo. Fuente: [2]	10
1.12	Bucle de potencia de la bancada de pruebas	11
1.13	Motores utilizados en Formula Student por los demás equipos. Fuente: [11]	12
1.14	Motor EMRAX propulsando al Apis EA2	12
1.15	EMRAX 228 LV mostrando su interior. Fuente: [10]	13
1.16	Detalle del bobinado y los imanes permanente de un EMRAX 228 LV. Fuente: [10]	14
1.17	Curvas par/potencia vs velocidad que proporciona EMRAX. Fuente: [6]	15
1.18	Interfaz principal del software de control NDrive	18
1.19	Curvas de calibración de diferentes termistores para el aviso por sobrecalentamiento en NDrive. Fuente: paquete de manuales descargables de Bamocar-D3	19
1.20	Lazos de control disponibles para un PMSM. Fuente: [5]	20
1.21	Esquemas del control de corriente en ejes dq y abc. Fuente: [7]	20
1.22	Efecto de la configuración de la rampa en la velocidad del eje. Fuente: [1]	22
2.1	Localización de la función especial que comienza el proceso de autophasing. Fuente: captura propia del software NDrive	25
2.2	Localización de la función especial que comienza el proceso de autophasing. Fuente: captura propia del software NDrive	26
2.3	Localización de la función especial que comienza el proceso de autophasing. Fuente: captura propia del software NDrive	28
2.4	Comparación de los puntos del ensayo y reordenamiento en base al menor error relativo en velocidad	29
2.5	Gráfico tensiones de línea vs velocidades de rotación. Ensayo del 26 de Marzo. Fuente: Propia	30
2.6	Gráfico tensión dc vs intensidad dc para la caracterización del bus DC en vacío. Ensayo del 4 de abril. Fuente: Propia	33
2.7	Gráfico que enfrenta la potencia DC con la intensidad DC. Ensayo del 4 de abril. Fuente: Propia	34

2.8	Caracterización del bus DC con la velocidad. Fuente: Propia	34
2.9	Comparación de la potencia eléctrica utilizada representada con la correspondiente potencia mecánica. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia	35
2.10	Diagrama Bode de comparación de los posibles filtros a usar en el procesamiento de las señales con distorsión. Fuente: Propia	37
2.11	Representación de la característica tensión de línea-velocidad del motor. Se comparan los resultados con las ondas en bruto y filtradas a 12 kHz con la pendiente teórica del motor. Fuente: propia	38
2.12	Representación de la característica tensión de fase-velocidad del motor. Fuente: propia	39
2.13	Captura del FAQ de Bamocar que hace sospechar que la constante no está expresada en tensión de línea, si no en magnitud de fase. Fuente: [20]	40
3.1	Gráfico que muestra la correspondencia entre la consigna M set y el par desarrollado en el ensayo a freno bloqueado. Fuente: Propia	43
3.2	Extracto de los apéndices C y D para mostrar la forma de onda típica de estas aplicaciones de potencia en el EMRAX 228 y su contenido armónico. Más gráficas en Apéndice C y Apéndice D. Fuente: Propia	45
3.3	Gráficos de las principales magnitudes del ensayo Acceleration con respecto a la consigna dada. Fuente: propia	47
3.4	Caracterización de la curva par-intensidad del motor. Fuente: Propia	48
3.5	Gráficos de las principales magnitudes del ensayo Acceleration con respecto a la consigna dada. Fuente: propia	48
3.6	Caracterización de la curva par-intensidad del motor. Fuente: Propia	50
3.7	Caracterización de la curva par-intensidad del motor mediante medidas de señales de control. Fuente: Propia	51
3.8	Pérdidas asociadas al aumento de la frecuencia de conmutación. Fuente: [15]	51
3.9	Gráficos de las principales magnitudes del ensayo Acceleration con respecto a la consigna dada. Fuente: propia	53
3.10	Potencias demandadas durante los dos ensayos de consigna en rotación. Fuente: propia	54
3.11	Gráficos de las principales magnitudes del ensayo Acceleration con respecto a la consigna dada. Fuente: propia	54
3.12	Test de aceleración variando el tiempo integral. Fuente: propia	59
3.13	Potencias demandadas durante los dos ensayos de consigna en rotación. Fuente: propia	60
3.14	Potencias demandadas durante los dos ensayos de consigna en rotación. Fuente: propia	60
4.1	Energy meter proporcionado en FSG como dispositivo para monitorización y recogida de datos del tren de potencia. Fuente: Documentación de FSG	63
4.2	Convertidor de potencia bidireccional que ha sido construido en paralelo esta temporada en las instalaciones del Depto. de Ingeniería Eléctrica	64
A.1	Tensión de línea AB prueba V1. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia	67
A.2	Tensión de línea AB prueba V2. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia	68
A.3	Tensión de línea AB prueba V3. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia	68
A.4	Tensión de línea AB prueba V4. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia	69
A.5	Tensión de línea AB prueba V5. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia	69
A.6	Tensión de línea AB prueba V6. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia	70
A.7	Tensión de línea AB prueba V6. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia	70
A.8	Tensión de línea AB prueba V8. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia	71
A.9	Tensión de línea AB prueba V9. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia	71
A.10	Tensión de línea AB prueba V10. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia	72
A.11	Intensidad de fase A prueba V1. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia	72
A.12	Intensidad de fase A prueba V2. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia	73
A.13	Intensidad de fase A prueba V3. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia	73
A.14	Intensidad de fase A prueba V4. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia	74
A.15	Intensidad de fase A prueba V5. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia	74
A.16	Intensidad de fase A prueba V6. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia	75
A.17	Intensidad de fase A prueba V7. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia	75
A.18	Intensidad de fase A prueba V8. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia	76

A.19	Intensidad de fase A prueba V9. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia	76
A.20	Intensidad de fase A prueba V10. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: Propia	77
B.1	Tensiones de fase A y C prueba 0 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	80
B.2	Tensiones de fase A y C prueba 215 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	81
B.3	Tensiones de fase A y C prueba 555 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	82
B.4	Tensiones de fase A y C prueba 875 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	83
B.5	Tensiones de fase A y C prueba 1210 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	84
B.6	Tensiones de fase A y C prueba 1530 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	85
B.7	Tensiones de fase A y C prueba 1880 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	86
B.8	Tensiones de fase A y C prueba 2215 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	87
B.9	Tensiones de fase A y C prueba 2811 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	88
B.10	Tensiones de fase A y C prueba 4000 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	89
B.11	Análisis en frecuencia de la tensión de fase A prueba 215 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	89
B.12	Análisis en frecuencia de la tensión de fase A prueba 555 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	90
B.13	Análisis en frecuencia de la tensión de fase A prueba 875 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	90
B.14	Análisis en frecuencia de la tensión de fase A prueba 1210 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	91
B.15	Análisis en frecuencia de la tensión de fase A prueba 1530 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	91
B.16	Análisis en frecuencia de la tensión de fase A prueba 1880 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	92
B.17	Análisis en frecuencia de la tensión de fase A prueba 2215 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	92
B.18	Análisis en frecuencia de la tensión de fase A prueba 2811 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	93
B.19	Análisis en frecuencia de la tensión de fase A prueba 4000 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	93
B.20	Análisis en frecuencia de la tensión de fase A filtrada prueba 215 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	94
B.21	Análisis en frecuencia de la tensión de fase A filtrada prueba 555 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	94
B.22	Análisis en frecuencia de la tensión de fase A filtrada prueba 875 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	95
B.23	Análisis en frecuencia de la tensión de fase A filtrada prueba 1210 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	95
B.24	Análisis en frecuencia de la tensión de fase A filtrada prueba 1530 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	96
B.25	Análisis en frecuencia de la tensión de fase A filtrada prueba 1880 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	96
B.26	Análisis en frecuencia de la tensión de fase A filtrada prueba 2215 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	97
B.27	Análisis en frecuencia de la tensión de fase A filtrada prueba 2811 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	97
B.28	Análisis en frecuencia de la tensión de fase A filtrada prueba 4000 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	98
B.29	Análisis FFT de la tensión de línea AB prueba 215 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	98
B.30	Análisis FFT de la tensión de línea AB prueba 555 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	98
B.31	Análisis FFT de la tensión de línea AB prueba 875 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	99
B.32	Análisis FFT de la tensión de línea AB prueba 1210 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	99
B.33	Análisis FFT de la tensión de línea AB prueba 1530 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	99
B.34	Análisis FFT de la tensión de línea AB prueba 1880 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	100
B.35	Análisis FFT de la tensión de línea AB prueba 2215 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	100
B.36	Análisis FFT de la tensión de línea AB prueba 2811 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	100
B.37	Análisis FFT de la tensión de línea AB prueba 4000 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	101
B.38	Análisis FFT de la tensión de línea AB filtrada prueba 215 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	101
B.39	Análisis FFT de la tensión de línea AB filtrada prueba 555 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	102
B.40	Análisis FFT de la tensión de línea AB filtrada prueba 875 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	102
B.41	Análisis FFT de la tensión de línea AB filtrada prueba 1210 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	103
B.42	Análisis FFT de la tensión de línea AB filtrada prueba 1530 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	103
B.43	Análisis FFT de la tensión de línea AB filtrada prueba 1880 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	104
B.44	Análisis FFT de la tensión de línea AB filtrada prueba 2215 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	104
B.45	Análisis FFT de la tensión de línea AB filtrada prueba 2811 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	105

B.46	Análisis FFT de la tensión de línea AB filtrada prueba 4000 rpm. Ensayo del 10 de junio. Fuente: Propia	105
C.1	Representación temporal intensidades de fase prueba 1440 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	108
C.2	Representación temporal intensidades de fas prueba 2100 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	109
C.3	Representación temporal intensidades de fase prueba 2670 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	110
C.4	Representación temporal intensidades de fase prueba 3490 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	111
C.5	Representación temporal intensidades prueba 3900 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	112
C.6	Representación temporal intensidades filtradas prueba 1440 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	113
C.7	Representación temporal intensidades filtradas prueba 2100 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	114
C.8	Representación temporal intensidades filtradas prueba 2670 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	115
C.9	Representación temporal intensidades filtradas prueba 3490 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	116
C.10	Representación temporal intensidades filtradas prueba 3900 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	117
C.11	Representación temporal tensiones de fase prueba 1440 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	118
C.12	Representación temporal tensiones de fase prueba 2100 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	119
C.13	Representación temporal tensiones de fase prueba 2670 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	120
C.14	Representación temporal tensiones de fase prueba 3490 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	121
C.15	Representación temporal tensiones de fase prueba 3900 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	122
C.16	Representación temporal tensiones línea prueba 1440 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	123
C.17	Representación temporal tensiones línea prueba 2100 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	124
C.18	Representación temporal tensiones línea prueba 2670 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	125
C.19	Representación temporal tensiones línea prueba 3490 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	126
C.20	Representación temporal tensiones línea prueba 3900 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	127
D.1	Análisis en frecuencia de las intensidades prueba 1440 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	129
D.2	Análisis en frecuencia de las intensidades prueba 2100 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	130
D.3	Análisis en frecuencia de las intensidades prueba 2670 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	130
D.4	Análisis en frecuencia de las intensidades prueba 3490 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	130
D.5	Análisis en frecuencia de las intensidades prueba 3900 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	131
D.6	Análisis en frecuencia de las tensiones de fase prueba 1440 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	131
D.7	Análisis en frecuencia de las tensiones de fase prueba 2100 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	132
D.8	Análisis en frecuencia de las tensiones de fase prueba 2490 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	132
D.9	Análisis en frecuencia de las tensiones de fase prueba 2670 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	133
D.10	Análisis en frecuencia de las tensiones de fase prueba 3900 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	133
D.11	Análisis en frecuencia de las tensiones de línea prueba 1440 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	134
D.12	Análisis en frecuencia de las tensiones de línea prueba 2100 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	134
D.13	Análisis en frecuencia de las tensiones de línea prueba 2670 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	135
D.14	Análisis en frecuencia de las tensiones de línea prueba 3490 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	135
D.15	Análisis en frecuencia de las tensiones de línea prueba 3900 Num. Ensayo Acceleration. Fuente: Propia	136

Índice de Tablas

1.1	Posibles estados en la potencia del bucle cerrado en función del régimen motor. Fuente: [2]	11
1.2	Máquinas síncronas	16
1.3	Convertidores de potencia	17
2.1	Pruebas realizadas para caracterizar la relación rpm-Num	24
2.2	Datos registrados a mano en el primer ensayo en vacío	26
2.3	Datos registrados a mano en el primer ensayo en vacío	30
2.4	Caracterización del bus DC. Datos tomados a manos de los aparatos de medida. Ensayo del 4 de abril. Fuente: propia	33
2.5	Tabla para el cálculo aproximado de la potencia mecánica durante el ensayo en vacío. Ensayo del 26 de marzo. Fuente: propia.	35
2.6	Valores RMS de las tensiones de fase sin y con filtrado a 12 kHz. Fuente: propia	37
2.7	Valores RMS de las tensiones de línea sin y con filtrado a 12 kHz. Fuente: propia	37
3.1	Datos correspondientes al ensayo a freno bloqueado. Fuente: Propia	44
3.2	Tablas de valores RMS de las principales magnitudes del ensayo Acceleration. Fuente: propia	46
3.3	Datos para la caracterización de la curva par-intensidad del motor. Fuente: Propia	46
3.4	Pérdidas asociadas al aumento de la frecuencia de conmutación . Fuente: Propia	55
3.5	Pérdidas asociadas al aumento de la frecuencia de conmutación . Fuente: Propia	55

Índice de Códigos

2.1	Exportación a Simulink y tratamiento de los datos del ensayo en vacío	26
2.2	Generación y guardado automático de gráficas para los ensayos de vacío	31
3.1	Código cargado en el motor BLS-192 para la simulación de las fuerzas opositoras al movimiento	41
3.2	Código para la carga y representación de los datos recogidos vía CAN	55

Bibliografía

- [1] *MANUAL Digital Three-phase Servo Amplifier BAMOCAR-PG-D3*.
- [2] Fernando Almagro Yravedra, *Diseño, construcción y validación de bancada de ensayo de motores*, (2018).
- [3] Carlos Castillo Lasanta, *Diseño, desarrollo e implementación de un sistema de seguridad para un monoplaça de Formula Student Electric*, (2019).
- [4] Fluke Corporation, *374 fc/375 fc/376 fc Clamp Meter Users Manual*, September 2015.
- [5] S. Derammelaere, M. Haemers, J. De Viaene, F. Verbelen, and K. Stockman, *A quantitative comparison between bldc, pmsm, brushed dc and stepping motor technologies*, 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Nov 2016, pp. 1–5.
- [6] EMRAX d.o.o., *Technical Data and Manual for EMRAX Motors / Generators*, (2018).
- [7] J.M. Mauricio Ferramola, *Apuntes accionamientos y movilidad eléctrica*, (2019).
- [8] Formula Student Germany, *Formula Student Rules 2019 V2.1*, (2019).
- [9] Groupe Infranor, *Xtrapuls GDPS power supply unit*, 2012.
- [10] Ben Katz, *EMRAX Motor Teardown*, 2017.
- [11] D.S. Korobkov and O.V. Ufimtseva, *Choice of the traction motor for the electric racing car “formula student”*, Procedia Engineering **150** (2016), 283 – 288, 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016).
- [12] Gonzalo López Díaz, *Diseño de un modelo en simulink para la simulación de inversor y motor en un vehículo eléctrico*, (2019).
- [13] M. J. Melfi, S. Evon, and R. McElveen, *Induction versus permanent magnet motors*, IEEE Industry Applications Magazine **15** (2009), no. 6, 28–35.
- [14] J. Pippuri, A. Manninen, J. Keränen, and K. Tammi, *Torque density of radial, axial and transverse flux permanent magnet machine topologies*, IEEE Transactions on Magnetics **49** (2013), no. 5, 2339–2342.
- [15] A. G. Sarigiannidis and A. G. Kladas, *Switching frequency impact on permanent magnet motors drive system for electric actuation applications*, IEEE Transactions on Magnetics **51** (2015), no. 3, 1–4.
- [16] R. M. Schupbach and J. C. Balda, *A versatile laboratory test bench for developing powertrains of electric vehicles*, Proceedings IEEE 56th Vehicular Technology Conference, vol. 3, Sep. 2002, pp. 1666–1670 vol.3.
- [17] M. Spichartz, M. Oettmeier, C. Heising, V. Staudt, and A. Steimel, *Stator-flux-oriented control with high torque dynamics for im and pmsm*, 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Sep. 2010, pp. 1–6.

- [18] Inc The MathWorks, *Average-Value Inverter (three-phase)*, 2019.
- [19] Unitek, *Pc software manual for the servo amplifier ds, dpc and the battery drives bamo-d, bamobil-d, bamocar-d*, (2017).
- [20] GmbH Unitek, *Bamocar FAQ*, (2018).
- [21] Yokogawa electric corporation, *DL850/DL75P ScopeCorder*, (2005).

